

Analiza utjecaja ionosferskog kašnjenja na satelitsko određivanje položaja sustavom GPS u polarnim predjelima

Jurki, David

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:716335>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-08**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

DAVID JURKI

**ANALIZA UTJECAJA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA NA
SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA SUSTAVOM GPS
U POLARNIM PREDJELIMA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2023.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

**ANALIZA UTJECAJA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA NA
SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA SUSTAVOM GPS
U POLARNIM PREDJELIMA**

**THE ANALYSIS OF IONOSPHERIC DELAY EFFECTS
ON GPS POSITIONING IN POLAR AREAS**

DIPLOMSKI RAD

Kolegij: Primijenjena satelitska navigacija

Mentor: izv. prof. dr. sc David Brčić

Komentor: prof. emer. Serđo Kos

Student: David Jurki

Studijski smjer: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112071590

Rijeka, ožujak 2023.

Student: David Jurki

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112071590

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom ANALIZA UTJECAJA IONOSFERSKOG KAŠNJENJA NA SATELITSKO ODREĐIVANJE POLOŽAJA SUSTAVOM GPS U POLARNIM PREDJELIMA izradio/la samostalno pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Davida Brčića, te komentorstvom prof. emer. Serđa Kosa.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrizirajući naveo u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



David Jurki

Student: David Jurki

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

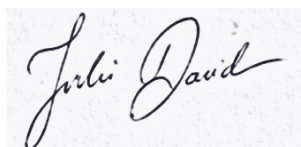
JMBAG: 0112071590

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor

A handwritten signature in black ink, reading "Jurki David", written in a cursive style.

(potpis)

PREDGOVOR

Poštovana obitelj, prijatelji te mentor i komentor,

Želim iskazati veliku zahvalnost za vašu neizmjernu podršku i pomoć tijekom mog akademskog putovanja i dok sam pisao diplomski rad.

Mentoru izv. prof. dr. sc. Davidu Brčiću veliko hvala što ste mi uvijek bili na raspolaganju, pružili mi puno savjeta te pomogli pri pisanju ovoga rada. Vaše znanje i iskustvo bili su od iznimne pomoći pri istraživanju i pisanju. Hvala Vam na što ste uvijek imali strpljenja i vremena za sve moje upite.

Također se želim iskreno zahvaliti i prof. emer. Serđu Kosu. Vaša stručnost i savjetovanje tijekom pisanja uvelike su doprinijele da rad poprimi ovaj konačan oblik.

Mojim prijateljima se želim zahvaliti što su me uvijek bodrili i ohrabrivali da uvijek idem naprijed. Hvala Vam na tome!

Na kraju, posebnu zahvalu upućujem mojim roditeljima i bratu koji su mi uvijek bili iznimna podrška tijekom studiranja. Hvala vam na svemu jer bez vas ovo ne bi bilo moguće.

Veliko hvala svima!

Jurki David

SAŽETAK:

Signal koji je odaslan s GPS satelita ka njegovom korisniku, podložen je utjecaju ionosfere stvarajući tako njegovo kašnjenje. To kašnjenje signala naziva se ionosfersko kašnjenje te kao rezultat daje odstupanje položaja korisnika. Ionosfersko kašnjenje ovisi o nekoliko parametara; količini slobodnih elektrona, geografskom položaju korisnika itd. Ionosfera jest ionizirani sloj Zemlje koji je pod izravnim utjecajem Sunca. Sunčeva aktivnost s vremenom može biti jačeg intenziteta stvarajući tako geomagnetske oluje. Jedna od većih zabilježenih geomagnetskih oluja bila je 2015. godine u mjesecu ožujku.

Ovaj rad daje uvid u odstupanja položaja korisnika koji je smješten na sjevernom polu u periodu od 15 dana u ožujku 2015. godine. Na tri referentne stanice upotrijebit će se određena metodologija kojom će se istražiti problematika odstupanja korisnika te istražiti model ispravke ionosferskog kašnjenja.

Ključne riječi: Svemirsko vrijeme, ionosfersko kašnjenje, ionosfera polarnih širina, GPS, statistička analiza odstupanja položaja, Klobucharev model ispravke ionosferskog kašnjenja

SUMMARY:

The signal sent from the GPS satellite to its user is under the influence of the ionosphere, thus creating its delay. This signal delay is called the ionospheric delay and as a result it gives a deviation of the user's position. The ionospheric delay depends on several parameters: the amount of free electrons, the geographical position of the user *etc.* The ionosphere is the ionized layer of the Earth that is under the direct influence of the Sun. Solar activity can increase its intensity over time, creating geomagnetic storms on planet Earth. One of the biggest recorded geomagnetic storms was in 2015 in March.

This paper provides an insight into the deviations of the user position who is located at the North Pole during a period of 15 days in March of 2015. At three reference stations, a specific methodology will be used to investigate the problem of user deviation and to investigate correction model for ionospheric delay.

Key words: Space weather, ionospheric delay, ionosphere in polar area, GPS, statistical analysis of positional deviation, Klobuchar ionospheric delay correction model

SADRŽAJ

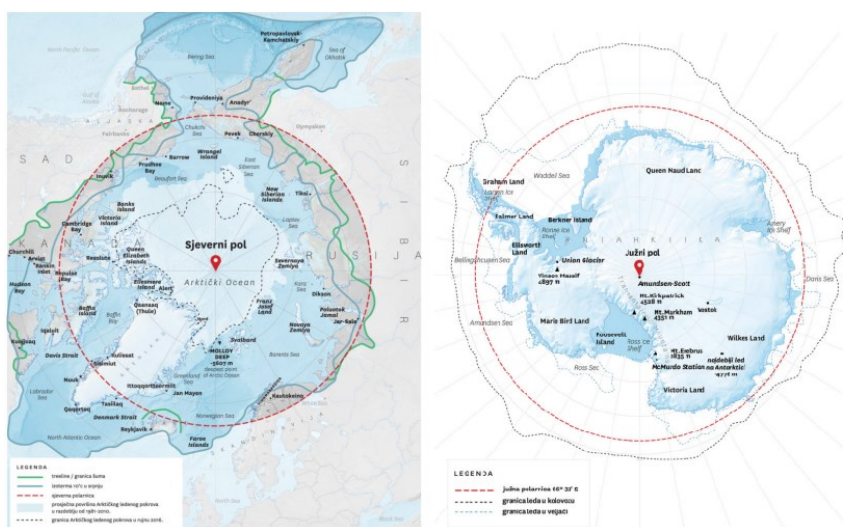
SAŽETAK:	III
SADRŽAJ	IV
1. UVOD	1
1.1 Problem, predmeti i objekti istraživanja	2
1.2. Radna hipoteza	2
1.3. Svrha i ciljevi istraživanja	3
1.4 Znanstvene metode.....	3
1.5 Struktura rada.....	5
2. ZNAČAJNE ODREDNICE SVEMIRSKOG VREMENA	6
2.1 SUNCE	10
2.1.1. <i>Struktura Sunca</i>	11
2.1.2. <i>Sunčeva aktivnost</i>	15
2.2 RELEVANTNE ZNAČAJKE GEOPROSTORA	17
2.2.1 <i>Osnovne dinamike ionosfere</i>	18
2.2.2 <i>Ionosfera pri Zemljinim polovima</i>	21
2.2.3 <i>Propagacija signala kroz ionosferu</i>	24
3. GLOBALNI NAVIGACIJSKI SATELITSKI SUSTAV	29
1.1 Globalni sustav određivanja položaja (GPS).....	32
3.2 Preduvjeti određivanja položaja	35
3.3 Princip rada GPS sustava	37
4. ISTRAŽIVANJE	44
4.1 Korišteni alati	45
4.2 Promatrano razdoblje	50
4. 3 Rezultati istraživanja	53

4.3.1. TEC vrijednosti.....	53
4.3.2 Odstupanja položaja.....	55
4.3.2.1. Stanica Thule (THU)	56
4.3.2.2 Stanica Ny-Alesund (NYAL)	62
4.3.2.3 Stanica Scoresbysund/Ittoqqoormiit (SCOR).....	68
4.4. ANALIZA ODSUPANJA POLOŽAJA KROZ PERIOD OD 15 DANA U RAZLIČITIM UVJETIMA SVEMIRSKOG VREMENA.....	74
4.4.1. Period relativno stabilnog svemirskog vremena (Period A)	75
4.4.2. Period intenzivnog svemirskog vremena i geomagnetska oluja (Period B)..	79
4.4.3. Period umjerene Sunčeve aktivnosti (Period C)	82
5. RASPRAVA I USPOREDBA REZULTATA SA PRIJAŠNJIM ISTRAŽIVANJIMA.....	86
6. ZAKLJUČAK	90
7. LITERATURA.....	91
8. POPIS SLIKA	95
9. POPIS TABLICA	98
10. PRILOG	100
Prilog 1: Programski kod provedenih istraživanja u programskom okruženju	100
Prilog 2: Odstupanja položaja prilikom uključenog te isključenog modela ispravke.....	112
Prilog 3: Statistički opisi TEC vrijednosti	120
Kroz cijeli period od 10. do 24. ožujka 2015. godine.....	120
Statističke vrijednosti posebno za svaki dan u promatranom periodu	120

1. UVOD

Bilo da se radi o dobivanju uputa o smjeru kretanja pri gradskoj vožnji automobilom, plovidbi broda diljem svijeta ili pak kreiranje objava na društvenim mrežama – položaj će biti dobiven putem globalnog pozicijskog sustava (engl. *Global Positioning System* – **GPS**). Pri korištenju alata i programa za dobivanje i kreiranje položaja, vrlo rijetko se postavlja pitanje o točnosti položaja koji se stvara na ekranu korisnika. Svaki dobiveni položaj rezultat je proračuna putem emitiranog signala sa satelita. Odašiljan signal podložen je vanjskim utjecajima uzrokujući time svoje kašnjenje, odnosno pogreške pri izračunu pozicije korisnika. Jedan od utjecaja jest utjecaj ionosfere koje se u praksi naziva „ionosfersko kašnjenje“.

Ionosfera je ionizirani sloj unutar atmosfere koji je pod konstantnim promjenama i pod izravnim utjecajima dinamike svemirskog vremena; fizikalno-kemijskih utjecaja na relaciji Sunce – Zemlja. Utjecaji Sunčeve aktivnosti mogu s vremenom biti „veće“ nego inače što se naziva geomagnetska oluja. Oluja kreće sa Sunca prema Zemlji uzrokujući time promjene u Zemljinoj ionosferi što izravno djeluje na signal koji putuje iz satelita prema korisniku. Efekt Sunčeve aktivnosti nije jednaka na svim dijelovima Zemlje; efekt nije jednak u niskim geografskim širinama ili višim geografskim širina prema polovima. Na polovima dolazi do pojave da su silnice geomagnetskog polja povezane s vanjskim dijelom magnetosfere što to područje polova čini izravno podložno utjecaju sa Sunca¹. Zemljini polovi su područja iznad 66° 33' geografske širine i predstavljaju centar Zemljine južne i sjeverne polutke.



Slika 1. Područja Sjevernog pola (lijevo) i Južnog pola (desno)

Izvor: <https://www.kek.hr/uvod-u-polarne-krajeve/>

¹ Brčić, D. (2015): *Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*. Doktorska disertacija. Rijeka, Hrvatska: Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, p. 30

Ovaj rad predstavlja analizu problematike odstupanja položaja dobivenog putem GPS-a u polarnim predjelima uzrokovanim anomalijama unutar ionosfere tijekom različitih stanja svemirskog vremena u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. Kroz nekoliko poglavlja pitanje o odstupanju korisnikovog položaja će se ispitati na konkretnim statističkim zapisima te doći do zaključka u kojemu će se podvući crta te konkretno i jasno obrazložiti kako različita stanja svemirskog vremena utječu na ionosfersko kašnjenje signala iz satelita pri sjevernom polu.

1.1 Problem, predmeti i objekti istraživanja

Problematika istraživanja je sljedeća: u kolikoj mjeri ionosfersko kašnjenje utječe na satelitsko određivanje položaja uslijed različitih stanja svemirskog vremena u polarnim predjelima.

Sukladno problematici istraživanja definiran je i *predmet istraživanja*: Putem statističkih podataka istražiti utjecaj ionosferskog kašnjenja na određivanje položaja sustavom GPS na područjima visokih geografskih širina.

Kompletan istraživački rad temelji se na idućim *objektima istraživanja*: položajni zapisi (THU200GRL, SCOR00GRL, NYAL00NOR), ionosfera i ionosfersko kašnjenje na polarnim predjelima, GPS sustav, svemirsko vrijeme.

1.2. Radna hipoteza

Radna hipoteza koja je dobivena na temelju problema rada, predmeta istraživanja te objekata istraživanja je sljedeća: značajnija aktivnost Sunca u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine razlog je povećanju odstupanja položaja korisnika smještena na sjevernom polu dobivena putem GPS

Sukladno tome radna hipoteza upućuje na pomoćne hipoteze:

- **P.H.1.:** Do pojave znatne promjene svemirskog vremena i Sunčeve aktivnosti, odstupanja GPS-a bile su manje
- **P.H.2.:** Povećani transfer energije i materije sa Sunca aktivnosti utječe na odstupanje položaja
- **P.H.3.:** Sunčeva aktivnost bila je iznimno jaka 2015. godine
- **P.H.4.:** Količina elektrona u ionosferi se povećava prilikom jake Sunčeve aktivnosti

- **P.H.5.:** Signal koji putuje prema korisniku radi povećanja količine elektrona u ionosferi više kasni te izaziva pri tome i veća odstupanja korisnika
- **P.H.6.:** Pogrešku izazvanu ionosferskim kašnjenjem moguće je do određene mjere ukloniti uporabom Klobucharevog modela ispravke

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Na temelju problema istraživanja, predmeta, objekata istraživanja te radnom hipotezom popraćenom s šest pomoćnih hipoteza utvrđena je *svrha istraživanja*: istražiti i dokazati zakonitosti odstupanja u dobivanju položaja GPS-om radi ionosferskog kašnjenja pri satelitskom određivanju položaja u polarnim predjelima.

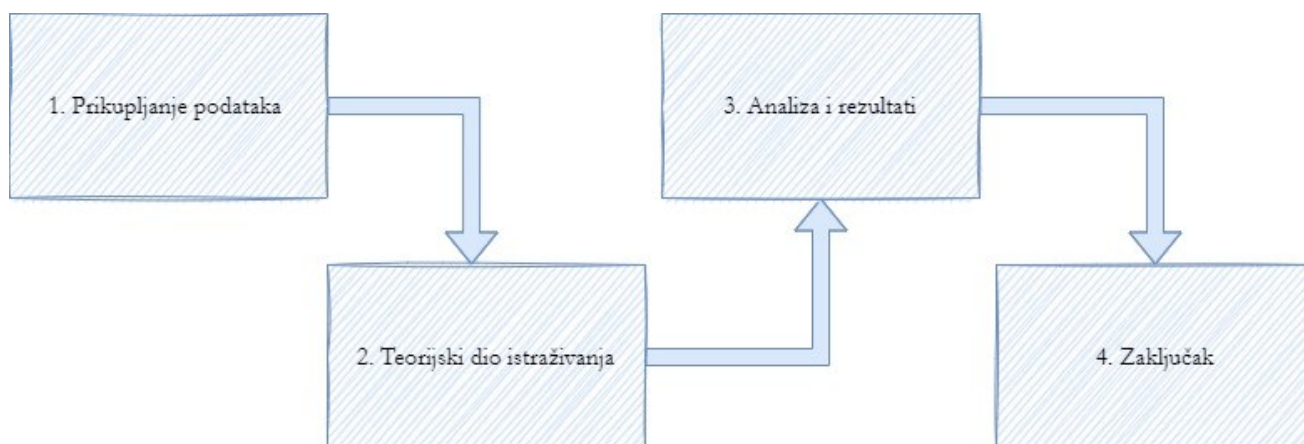
U radu se odgovara na mnoštvo pitanja među kojima se najviše ističu *sljedeća*:

- Jesu li odstupanja postepeno veća ili manja tijekom perioda od 10. do 24. ožujka 2015. godine?
- Kolika su točno odstupanja u periodu istraživanja?
- Mijenja li se količina elektrona u periodu istraživanja od 15 dana?
- Kakvo je stanje svemirskog vremena u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine?
- Je li stanje svemirskog vremena u mjesecu ožujku isto kao i prethodne godine?

1.4 Znanstvene metode

Prilikom izrade znanstveno-istraživačkog rada korištene su brojne znanstvene metode te nekoliko računalnih programa putem kojih se izvršila analiza podataka.

Istraživanje je teklo u sveukupno četiri koraka, a pojedinačne faze prikazane su dijagramom.



Slika 2. Dijagram tijeka istraživanja

Prva faza jest **prikupljanje podataka**. *A priori* istraživanju odabralo se geografsko područje istraživanja te stanice koje će se promatrati i istraživati. Zatim su se prikupili podaci potrebni za istraživanje te odredili da će se računalni programi *RTKLIB*, *GPS_TEC* te *R studio* koristiti za obradu tih podataka i dobivanje konačnih rezultata. U prvoj fazi ponajviše se koristilo metodama apstrakcije i konkretizacije kako bi se radi velikog obujma podataka i informacija istakli bitni elementi koji će se koristiti prilikom istraživanja.

Sljedeća faza jest postaviti temelj istraživanju. Ovaj rad temelji se na istraživanju utjecaja ionosferskog kašnjenja na određivanje položaja korisnika smještena pri sjevernom polu Zemlje. Ionosfersko kašnjenje signala posljedica je sadržaja slobodnih elektrona koji se nalaze u ioniziranom sloju Zemljine atmosfere, podložnom i utjecaju sa Sunca. Signal koji je odaslan prema korisniku dolazi iz sustava satelita Globalnog Pozicijskog Sustava koji je u širokoj upotrebi među populaciji diljem svijeta. Za prikupljanje podataka o **teorijskom dijelu** koji se zasniva na teoriji o Suncu, Sunčevoj aktivnosti, ionosferi i njevoj morfologiji (s naglaskom na ionosferu pri Zemljinom južnom i sjevernom polu) te konačno o GPS sustavu i njegovu načinu određivanja položaja koristilo se metodama deskripcije, analize i sinteze te komparacije i kompilacije.

Predzadnja faza znanstvenog rada jest **analiza i rezultati**. U ovom dijelu istraživanja koje slijedi nakon teorijske osnove, obavljena je analiza utjecaja ionosferskog kašnjenja prilikom satelitskog određivanja položaja. Na temelju statističkih zapisa o tri referentne stanice smještene pri sjevernom polu Zemlje odvijalo se istraživanje i kompletna analiza odstupanja u periodu od 15 uzastopnih dana u ožujku 2015. godine. Uz statističke zapise, u obzir pri analizi podataka uzeti su i podaci o stanju svemirskog vremena i ukupnom sadržaju elektrona. Na temelju rezultata o odstupanjima, ukupnom sadržaju elektrona u ionosferi, stanju svemirskog vremena i općem stanju Sunca dolazi se do konačnih rezultata istraživanja. U ovoj fazi koristilo

se statističkom i matematičkom metodom kao i metodom proračuna i obrade podataka računalnim programima Rtklib, GPS_TEC te R studio. Nakon dobivenih rezultata kreće se na posljednju fazu istraživanja, a to je donošenje zaključaka.

Zadnja faza **zaključak** uključuje analizu i deskripciju dobivenih rezultata istraživanja. Također uključuje i usporedbu i razmatranje prijašnjih istraživanja vezano za istu tematiku – istraživanja utjecaja ionosferskog kašnjenja na određivanje položaja sofisticiranim satelitskim sustavima.

1.5 Struktura rada

U ovom radu kroz će se kroz pet poglavlja odgovoriti na pitanja o odstupanju položaja globalnog pozicijskog sustava izazvanim ionosferskim utjecajima pri polovima Zemlje.

Isprva će se u *uvodu* uvesti u problematiku istraživanja popraćeno s predmetima i objektima istraživanja. Zatim će se iznesti radna hipoteza popraćena s nekoliko pomoćnih hipoteza te svrha i ciljevi istraživanja. Na kraju će se prikazati i koje su znanstvene metode bile korištene prilikom istraživanja.

Iduće poglavlje jest o *značajnim odrednicama svemirskog vremena*. Ovo poglavlje pruža teorijske osnove ponajprije o Suncu; njegovoj strukturi te aktivnosti i kako utječe na međuzvjezdani prostor. Nakon toga pisati će se o ionosferi, njevoj morfologiji i osnovnoj dinamici s naglaskom na ionosferi koja se nalazi da polovima Zemlje. Uz to, ovo poglavlje sadrži i teorijsku osnovu o propagaciji signala kroz ionosferu.

Nakon toga slijedi poglavlje o *globalnom navigacijskom satelitskom sustavu* sa naglaskom na jedan sustav – GPS. U ovome poglavlju slijedi opis GPS sustava, kako se položaji dobivaju kada se koristi ovim sustavom te koji je princip rada; koji su preduvjeti te što je sve potrebno da korisnik dobije vlastiti položaj GPS sustavom.

Nakon teorijskih osnova slijedi poglavlje *istraživanje*. U ovom poglavlju će se prikazati kako se odvijao tijek istraživanja te kako i na koji način rade programi namijenjeni za obradu podataka. Nakon toga će se grafičkim prikazima i statističkim podacima iznesti rezultati o analizu utjecaja ionosferskog kašnjenja.

Posljednja poglavlja ovoga rada su *zaključak* i *razmatranja* te literatura. U poglavlju razmatranja koje prethodi sveukupnom zaključku sadržana je analiza dobivenih rezultata kroz period od 15 dana od 10. do 24. ožujka 2015. godine kao i usporedba sa prijašnjim

istraživanjima. Nakon toga slijedi konačan zaključak sa konačnim riječima o cjelokupnom istraživačkom procesu popraćeno s literaturom i priložima koji se nalaze na kraju rada.

2. ZNAČAJNE ODREDNICE SVEMIRSKOG VREMENA

Međuplanetarni prostor koji se doima praznim zapravo je pod čestim utjecajem Sunčeva zračenja. Pojam *svemirsko vrijeme* naziv je za niz procesa i pojava u svemiru u kojemu se događaju mnogi izboji, promjene čestica i elektromagnetskog polja koji potječu sa Sunca te putuju ka Zemlji². Također, može se i definirati na sljedeći način, koji je među strukom postao čak i uvrježeniji³:

„uvjeti na Suncu, u sunčevom vjetru, magnetosferi, ionosferi i termosferi koji mogu imati utjecaj na svojstva svemirskih i zemaljskih tehnoloških sustava”

Sunčevi odljevi čestica svojim intenzitetom, osim što utječu na komunikacijsku i satelitsku tehnologiju na Zemlji, izravno utječu i na kompletnu strukturu Zemljine atmosfere, točnije ionosfere i termosfere. Proces kada čestice sa Sunca utječu na Zemljinu magnetosferu naziva se geomagnetska oluja (engl. *Geomagnetic storm*). Utjecaj koji ima na ionosferu očituje se preko ukupnog sadržaja elektrona (engl. *Total Electron Unit – TEC*) ili preko kritične frekvencije ionosferskog sloja F₂ (što se ponovno dobiva putem ukupnog sadržaja elektrona toga sloja ionosfere)⁴. S obzirom da je znači poznata činjenica da čestice sa Sunca putuju ka Zemlji, postavlja se sljedeće pitanje: *Je li Sunčeva aktivnost uvijek istog intenziteta?*

Intenzitet Sunčeve aktivnosti na Zemlju s vremenom može biti jačeg ili pak ne toliko jakog intenziteta. Sukladno tomu, jačinu svemirskog vremena na Zemlju može se dijeliti prema intenzitetu, kao što za vjetrove postoji na primjer *Beufortova ljestvica*. Nacionalna oceanska i atmosferska administracija (engl. *National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA*) u odsjeku za predviđanje svemirskog vremena (engl. *Space Weather Prediction Center*)

² Campbell H. W. (2003): *Introduction to Geomagnetic Fields*, Second Edition, New York, USA: Cambridge University Press, p. 111.

³ Goodman, J.M. (2005): *Space Weather and Telecommunications*, New York: Springer Science and Business Media

⁴ Kumar, S. i Kumar, V. V. (2019): *Ionospheric response to the St. Patrick's Day space weather events in March 2012, 2013, and 2015 at southern low and middle latitudes*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, (124), p. 584, online: <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>

analizira pojam i intenzitet poremećaja svemirskog vremena te ga dalje kategorizira u tri velike kategorije: geomagnetske oluje, sunčevo zračenje (radijacije) te radio praskovi.

Geomagnetska oluja uzrokuje poremećaje duž Zemljinog magnetskog polja djelujući tako na cijelu satelitsku i navigacijsku infrastrukturu. Solarne radijacijske oluje nastaju kada velike količine čestica (protoni i elektroni) sa Sunca bivaju nošeni sa Sunca ka Zemlji. Magnetsko polje pruža zaštitu od solarnih oluja, no kolika će zapravo ona biti ovisi o geografskoj širini, dužini te jačini tog polja. Polarne regije su najizloženije solarnim radijacijskim olujama radi položaja magnetskih silnica koje su usmjerene vertikalno – time se čestice spuštaju spiralno dolje duž silnica u atmosferu uzrokujući tako povećanu ionizaciju. Na kraju, radio praskovi su nastali su radi naleta X-zraka te ultraljubičastog zračenja sa Sunca⁵.

Ako bi se stupanj jačine svemirskog vremena promatrao u tim događajima, skala bi bila sljedeća:

NOAA skala intenziteta svemirskog vremena					
Geomagnetske oluje		Solarne radijacije		Radio praskovi	
Skala	Opis	Skala	Opis	Skala	Opis
G 1	nisko	S 1	nisko	R 1	nisko
G 2	umjereno	S 2	umjereno	R 2	umjereno
G 3	jako	S 3	jako	R 3	jako
G 4	ozbiljno	S 4	ozbiljno	R 4	ozbiljno
G 5	ekstremno	S 5	ekstremno	R 5	ekstremno

Tablica 1. NOAA skala intenziteta svemirskog vremena

Izvor: Izrada autora na temelju National Oceanica and Atmospheric Administration, National Weather Administration: *Types od Space Weather Storms*, online:<https://www.weather.gov/safety/space-storm-types#:~:text=%2BSolar%20Radiation%20Storms&text=Solar%20radiation%20storms%20occur%20when,bathed%20with%20high%20energy%20particles>

Nakon postavljene skale, postavlja se novo pitanje kako i na koji način kategorizirati jačinu Sunčeva zračenja, odnosno: *Prema čemu mjeriti jačinu Sunčeva zračenja i razlikovati radi li se primjerice o umjerenoj jačini ili ozbiljnoj?* Za identifikaciju jačine uzimaju se dva

⁵National Oceanica and Atmospheric Administration, National Weather Administration: *Types od Space Weather Storms*, online:<https://www.weather.gov/safety/space-storm-types#:~:text=%2BSolar%20Radiation%20Storms&text=Solar%20radiation%20storms%20occur%20when,bathed%20with%20high%20energy%20particles>

parametra: fizička mjera (engl. *Physical measure*) i srednja frekvencija (engl. *Average Frequency*) unutar jednog ciklusa u trajanju od 11 godina.

Fizička mjera kod promatranja geomagnetske oluje jest indikator stupnja planetarne vrijednosti K_p koji predstavlja stupanj geomagnetske aktivnosti dobiven preko K indeksa. Osnovan je na trosatnim mjerenjima stanja magnetosfere u mjernim stanicama postavljenih diljem Zemlje⁶. Srednja frekvencija za geomagnetsku oluju jest broj oluja kada je K_p dospjelo na određenu vrijednost⁷. Za geomagnetsku oluju točne vrijednosti se nalaze u tablici broj 2.

GEOMAGNETSKA OLUJA		
SKALA	K_p	Srednja frekvencija
G 1	5	1700
G 2	6	600
G 3	7	200
G 4	8	100
G 5	9	4

Tablica 2. Skala intenziteta geomagnetske oluje

Izvor: Izrada autora na temelju National Oceanica and Atmospheric Administration, National Weather Administration: *Types od Space Weather Storms*, online: <https://www.weather.gov/safety/space-storm-types#:~:text=%2BSolar%20Radiation%20Storms&text=Solar%20radiation%20storms%20occur%20when,bathed%20with%20high%20energy%20particles>

Geomagnetske oluje jačine G1 imaju iznimno niske učinke na satelitske operacije, dok geomagnetske oluje „višeg ranga“ jače utječu na satelite i njihovo radno stanje. Kada su u pitanju oluje G2 stupnja (ili više) problemi kao što je punjenje satelita ili pak njihovo točno lociranje su neizbježni te zahtijevaju dodatne radnje i provjere.

Pri promatranju solarne radijacijske oluje, fizička mjera je drugačija nego kod geomagnetske oluje. Umjesto K_p , kao parametar za promatranje uzima se druga mjera, a to je protok čestica (iona) sa Sunca na Zemlju (engl. *Flux*). Onda kada je protok iona veći ili jednak 10 MeV, onda se kaže da nastupa solarna radijacijska oluja; kao najmanja vrijednost uzima se protok jačine 10 MeV te se karakterizira kao oluja najnižeg stupnja („nisko“ ili po nomenklaturi NOAA S1)⁸.

⁶ Brčić D., Filjar R., Kos S. (2013): *An assessment of Geomagnetic activity – Related technology failure risk based on patterns of Kp Index Dynamics in 2012*, Proceedings of 7th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference, The Royal Institute of Navigation, London, UK & University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Baška, Hrvatska, p. 69

⁷ National Oceanica and Atmospheric Administration, Space Weather Prediction Center: *NOAA Space Weather Scales*, online: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

⁸ National Oceanica and Atmospheric Administration: *op.cit.*

SOLARNA RADIJACIJA		
SKALA	<i>Flux</i> (MeV)	Srednja frekvencija
S 1	10	50
S 2	10 ²	25
S 3	10 ³	10
S 4	10 ⁴	3
S 5	10 ⁵	≥1

Tablica 3. Skala intenziteta solarne radijacije

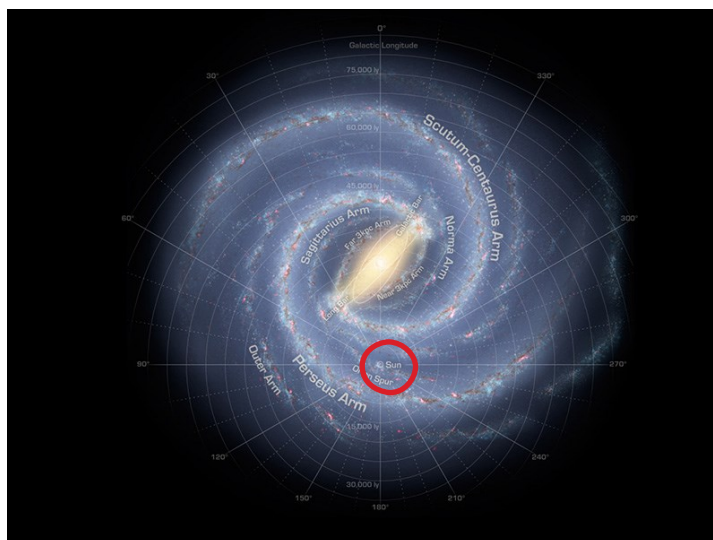
Izvor: Izrada autora na temelju National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Administration: *Types of Space Weather Storms*, online: <https://www.weather.gov/safety/space-storm-types#:~:text=%2BSolar%20Radiation%20Storms&text=Solar%20radiation%20storms%20occur%20when,bathed%20with%20high%20energy%20particles>

Srednja frekvencija za radio praskove je broj koji, kao i kod ostalih fenomena, označava broj događaja kada je razina *flux*-a narasla na neku određenu vrijednosti. Kao i kod ostalih klasa, kod radio praska niske razine nema jako velikog utjecaja na navigaciju te HF radio; navigacijski niskofrekventni signali znaju biti pod utjecajem naleta čestica te dati male i kratke pogreške na kratak vremenski period, a HF radio može biti onemogućen na također vrlo kratak period na osunčanoj strani Zemlje. Za radio prasak umjerene jačine navigacijski signali mogu davati pogreške, no u ovom slučaju takve pogreške neće biti samo na kratak period vremena, već na nekoliko desetaka minuta. HF radio će isto biti onemogućen na osunčanoj strani Zemlje u periodu od nekoliko desetaka minuta. Kako se intenzitet pojačava, tako se i utjecaj koje ima na HF radio te navigacijske uređaje isto povećava. Rastom intenziteta, signali za navigaciju znaju biti degradirani za i do čak nekoliko sati, a HF radio onemogućen. U slučaju najekstremnijih radio praskova, dobivanje položaja u navigacijskim uređajima će biti vrlo teško, a HF radiokomunikacija će bivati onemogućena.

Ovisno o kojem se poremećaju radi, učinci koje ono ima na Zemlju te satelitske, navigacijske i radio komponente ovise o jačini Sunčeva zračenja. Utjecaji koje ono ima su degradiranje položaja krajnjeg korisnika koji se koristi nekim od navigacijskih uređaja, nedostupnosti satelita te njihovo oštećenje (sami sateliti i komponenti) te na kraju nedostupnosti radiokomunikacije.

2.1 SUNCE

Sunce je zvijezda oko koje se okreće Zemlja i ostale planete Sunčevog sustava nastala otprilike prije 4.6 milijarde godina. Klasificirana je kao G2 V zvijezda „patuljaste“ veličine (engl. *dwarf*). Riječ „patuljasto“ ne znači je malog radijusa, već se veže uz pojam grupe zvijezda koje se nalaze na centralnom odjeljenju zvijezda (engl. *Central main sequence*) koji su posebni po svojim fotovizualnim obilježjima naspram temperature⁹. Radijus joj je oko 695 700 km, a masa 330 000 masa Zemlje. Od Zemlje je udaljena oko 150 000 km, a ukoliko gledamo smještaj Sunca u galaksiji, smještena je oko 3×10^{17} km od centra na „spiralnom kraku“ (engl. *spiral arm*).



Slika 3. Položaj Sunca

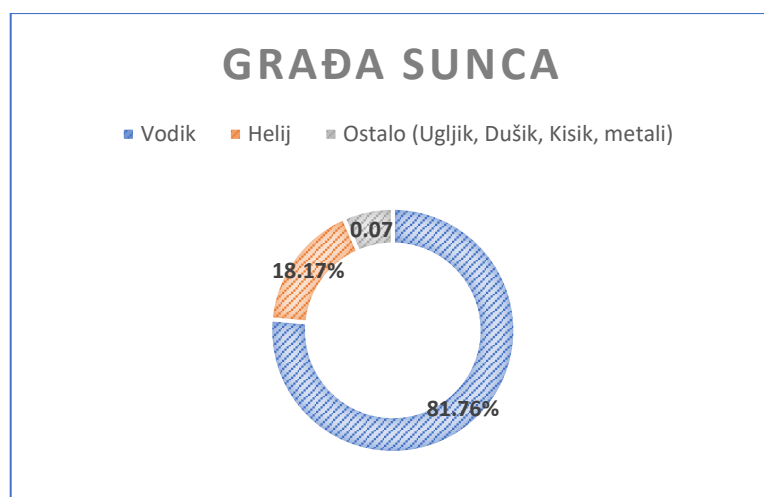
Izvor: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/#:~:text=The%20Sun%20is%20located%20in,outward%20from%20the%20Sagittarius%20arm.&text=The%20Sun%20orbits%20the%20center,objects%20in%20our%20solar%20system.>

Sunce se zajedno s galaktikom imena Mliječni put kreće prema zvijezdi Vodena zmija brzinom od 550 km/s, a krug oko središta galaksije napravi za 225-250 milijuna godina (tzv. Galaktička godina). Ako se te dvije brzine uzmu u obzir, rezultanta kretanja Sunca je oko 370 km/s u smjeru zvijezda Lav.

⁹ Campbell H. W. (2003.) : *op.cit.* p. 114

2.1.1. Struktura Sunca

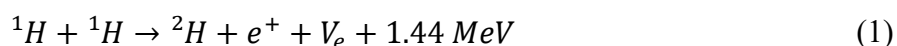
Kao što je već spomenuto, Sunce pripada u G2 kategoriju zvijezdi. Da je neka zvijezda upravo te kategorije znači sljedeće: spektroskopom uočene su najviše Ca (engl. *Calcium* – kalcij) linije koje su jače od H (engl. *Hydrogen* – vodik) linija te sadrže uz puno ioniziranih metala i neutralne metale. Žute je boje što je pokazatelj topline površine koja se kreće između 5000 i 6000 K¹⁰. Volumenom Sunce čini većinom vodik oko 81.76%¹¹.



Slika 4. Grada Sunca

Izvor: Izrada autora na temelju knjige Campbell H. W. (2003): *Introduction to Geomagnetic Fields*, Second Edition, New York, USA: Cambridge University Press, p. 114

Energiju koju emitira Sunce rezultat je pretvorbe atoma vodika u helij (nuklearna fuzija). Radi mase vodika (atomska masa) koja iznosi 1.0078, prilikom pretvorbe u helij čija je atomska masa 4.0026 sagorijevaju se sveukupno četiri vodikove jezgre na način da sedam tisuća dijelova svoje mase pretvara u energiju. Prilikom pretvorbe vodika u helij nastaje oko otprilike 6.8 milijuna elektronvolta u obliku γ -zračenja i kinetičke energije¹². Sveukupni proces nuklearne fuzije nastaje kada se sudare dva atoma vodika, odnosno dvaju protona čime se stvara deuterij ^2H (izotop vodika). Tim se procesom stvara jedan pozitron (e^+) i neutrino (ν_e).



¹⁰ Campbell H. W. (2003.): *op.cit.*, p. 113

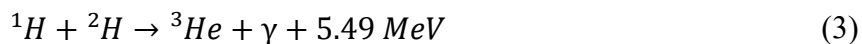
¹¹ Campbell H. W. (2003.): *op.cit.*, p. 113

¹² Lang K., Zirin H.: *Sun*, Encyclopedia Britannica, 4 Feb. 2021, online: <https://www.britannica.com/place/Sun>.

Prilikom procesa vezanja protona i neutrona djeluje jaka nuklearna sila; sila odgovorna za proces vezivanja. Nastali pozitron zajedno sa slobodnim elektronom (na koji je slučajno „naišao“) se anihilira. Procesom anihilacije dolazi do oslobađanja gama zraka.



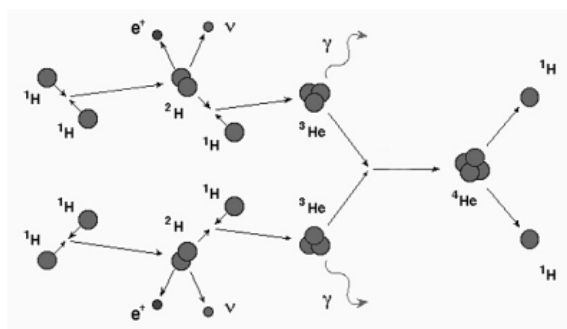
Proces fuzije vodika ne odvija se često, a stvaranje deuterija događa se tek u 10^{26} sudara na relaciji proton-proton, no kada se to dogodi se stvara jezgra helija ^3He te dolazi do oslobađanja foton gama zračenja.



Konačno, na kraju dolazi do sudara dvije jezgre ^3He koje nalijetanjem jedna na drugu stvaraju ^4He i dva protona.



Cjelokupni proces fuzije može se zapisati u kompletnom obliku kao reakcija (s uključenom anihilacijom)¹³:



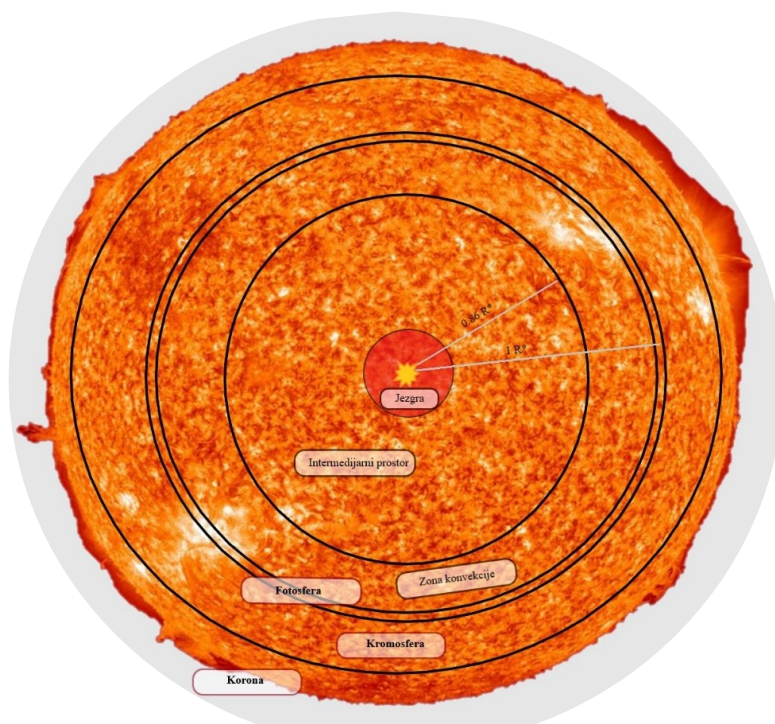
Slika 5. Grafički prikaz kemijskog procesa fuzije

Izvor: <https://hrcak.srce.hr/file/354981>

¹³N. Paar: *Nuklearni procesi u evoluciji supernove*, Matematičko-fizički list, LXII 1 (2011. – 2012.), online: <https://hrcak.srce.hr/file/354981>

U jezgri Sunca svake se sekunde oko 4.4 milijuna tona materije (vodika) pretvori u energiju. To rezultira tome da se svake sekunde kada se odvije pretvorba, Sunce izgubi oko 200 milijuna tona vlastite mase s površine. To gubljenje mase jest izboj čestica i energije (Sunčev vjetar, *et cetera*) koji odlazi u svemirski prostor.

Počevši od jezgre Sunca u kojoj se odvija proces nuklearne fuzije, energija putuje iz središta prema površini, odnosno prema okolini u svemir. Na udaljenosti od 0.86 solarnog radijusa nalazi se fotosfera (engl. *Photosphere*) debljine skoro 100 km. Nakon nje slijedi sloj kromosfera (engl. *Chromosphere*) koja je po svojim svojstvima tzv. prijelazna zona između fotosfere i izrazito vruće korone (engl. *Corona*). Sloj korona temperature je iznad 20 000 K. Regija korona pruža se u svemir gdje se spaja sa međuzvezdanim medijem¹⁴. Radi te svoje iznimno visoke temperature molekule se na koronarnom dijelu sunca raspadaju.



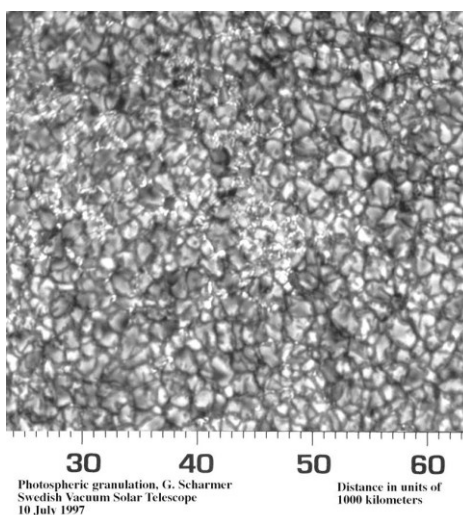
Slika 6. Sunce i njegova struktura

Izvor: Izrada autora na temelju knjige Campbell H. W. (2003.) *Introduction to Geomagnetic Fields*, Second Edition, New York, USA: Cambridge University Press, p. 113 - 115

Pogledom u Sunce, ono što zapaža oko jest upravo sloj fotosfere iz koje izvire gotovo sva Sunčeva svjetlost. Sloj fotosfere jest dinamičan sloj što znači da se konstantno rotira. Gibanjem fotosfere odvija se optičaj fotona iz unutra prema van. Dinamičan sloj kromosfera predstavlja

¹⁴ Lang K., Zirin H.: *op.cit.*

tranzitno područje između fotosfere i korone. Početak sloja kromosfere počinje na najhladnijem dijelu vanjskog dijela fotosfere. Gustoća u sloju kromosfere se smanjuje eksponencijalno s visinom, mnogo manje nego magnetsko polje koje je izrazito jako u ovom pojasu Sunca. Promatranjem Sunčeve površine te njezinih slojeva daje se zaključiti da struktura nije jednobojna, ugađena izgleda te homogena, već da se jasno daju zamijetiti područja koja su svjetlija, odnosno tamnija od drugih. Daju se i zamijetiti i strukture na površini koje se nazivaju *granule*. Granule su kružne strukture, mjehuri plazme, koji su prijenosnici Sunčeve tvari veličine do 1000 km. Svaka granula ima „životni vijek“ do 20-ak minuta, a kompletni uzorak granula na površini konstantno se mijenja. Sunčeve tvari unutar granula kreću se brzinom koja može doseći 7km/s. Strukture koje su veće od 1000 km nazivaju se mezogranule i imaju veličinu do 5000 km. Najveće strukture nazivaju se supergranule i veličine su do 35 000 km. Njihov „životni vijek“ je oko dan-dva, a kreću se po površini brzinom oko 0.5 km/s¹⁵.



Slika 7. Granule (Sunce)

Izvor: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml>

Posljednji, vanjski sloj Sunca jest korona. Korona je pojas na Suncu koji emitira rendgensko i ultraljubičasto zračenje, vrlo male gustoće s koncentracijom atoma manjom od $10^{15}/\text{m}^3$. Promjenjiva je oblika što znači da prati smjer magnetskog polja, a zanimljivo je da se golim okom sa Zemlje zapaža samo za vrijeme pomrčine. Za vrijeme izvan pomrčine, za promatranje ovog sloja Sunca koristi se koronograf. Iz korone nastaju erupcije gdje se Sunčeve tvari izbacuju u međuplanetarni prostor¹⁶. Temperatura korone iznosi oko 1 000 000 K.

¹⁵ Lang K., Zirin H.: *op.cit.*

¹⁶ Korona, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=33237>.

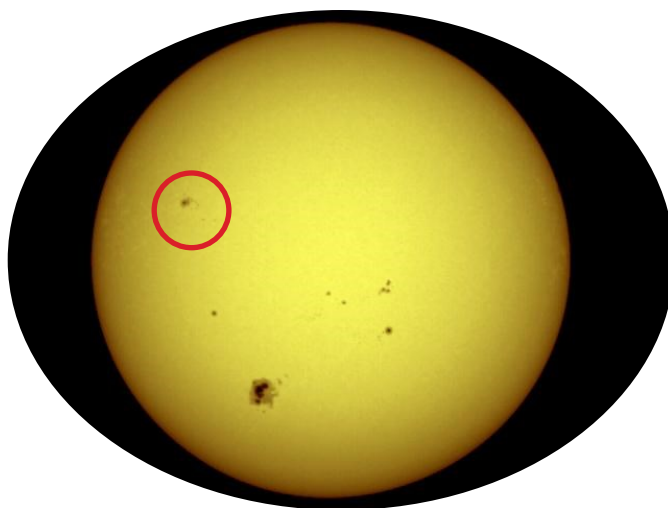
2.1.2. Sunčeva aktivnost

Geomagnetske oluje, solarne radijacije, radiopraskovi, sadržaj međuplanetarnog prostora itd. koji kao rezultat imaju utjecaj na Zemljinu atmosferu i rad Zemljinih satelita nastaju radi vrlo česte Sunčeve aktivnosti. Na površini Sunca dolazi do određenih reakcija iz kojih se u međuplanetaran prostor šire čestice i energija te dolaze do Zemljine atmosfere. Potrebno je oko 500 sekundi da se dogodi reakcija ionizacije u Zemljinoj atmosferi nakon što se dogodi emisija energije sa Sunca. Ukoliko se radi o većim i mnogo značajnijim promjenama u ionosferi će se dogoditi reakcija u periodu od 1 do 5 dana (plus vrijeme koje je potrebno da se dogodi reakcija u magnetosferi) dok čestice sa Sunca dođu do Zemlje¹⁷.

Prilikom definiranja Sunčeve aktivnosti, potrebno je prvo objasniti pojam Sunčeve pjege. Samo ime definira to kao zatamnjenje na Suncu koje je i vidljivo promatranjem njezine površine. Nastaje prvenstveno radi fluidne, nehomogene strukture Sunca i radi ispreplitanja silnica magnetskog polja. Plazma te magnetsko polje okreću se u smjeru sjever – jug, a radi strukture Sunca rotacija nije jednolika; heliografske širine se sporije kreću nego ekvatorijalne površine. Zbog toga dolazi do omotavanja magnetskog polja oko Sunca. Dolazi i do povećanja smjera magnetskog polje prema ekvatoru. Rastegnute silnice se isprepliću te dolazi do lokalnih heliomagnetskih polja koje vrše snažan pritisak na lokalnu plazmu, a kada magnetski tlak premašuje tlak plazme, polje prodire do površine Sunca te se pojavljuje u obliku bipolarnih petlji. Proces stvaranja Sunčevih pjega nastaje u vrlo koncentriranih silnicama magnetskog polja koje sprječavaju tok topline pa je mjesto na kojem izbijaju pjege na površinu malo hladnije od okoline, što se vidi da to područje postaje tamnije. Količine Sunčevih pjega nije uvijek jednak na sjevernoj i južnoj hemisferi; postoje periodi na Suncu kada je jedna hemisfera više aktivna nego druga¹⁸.

¹⁷Campbell H. W. (2003): *op.cit.*,p. 116

¹⁸ Campbell H. W. (2003): *op.cit.*,p 117



Slika 8. Sunčeve pjege

Izvor: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml>

Područja koja su u blizini Sunčevih pjega vrlo su često aktivna područja¹⁹. Uz pjege, petlje magnetskog polja, koronarni izbačaji, sunčeve baklje ili pak prominencije i filamenti nisu rijetkost, štoviše već su česte pojave koje se mogu uočiti na površini Sunca.

Petlja magnetskog polja posljedica je poremećaja Sunčeva magnetska polja gdje se nastaju Sunčevi bljeskovi – eksplozije ispunjene užarenim plinom izgledom poput vrlo žarko crvene petlje koja se prostire sa površine u međuplanetarni prostor. Koronarni izbačaji isto tako predstavljaju izbačaj određene mase sa površine Sunca u okolinu. Ono predstavlja eruptivnu promjenu globalne magnetske konfiguracije Sunčeve korone po čemu je i dobilo ime²⁰. Sunčeve baklje (engl. *Sun's flares*) rezultat su naglog oslobađanja magnetske energije unutar koje se nalazi plazma. Plazma se pretvara u kinetičku energiju, toplinu te svjetlost. Sunčeve baklje vrlo se često mogu uočiti upravo u području pjega. Na Suncu mogu se uočiti i prominencije i filamenti – pojave nalik oblaku koji se vidi iznad Sunčeva kruga. Ukoliko je ona svijetla naziva se prominencija, a ukoliko je tamna naziva se filament (ili vrpca)²¹.

Za širenje i gibanje Sunčevih izbačaja čestica u međuplanetarni prostor glavni ulogu preuzima Sunčev vjetar (engl. *Solar wind*). Sunčev vjetar također sa sobom nosi i međuplanetarno magnetsko polje koji može Zemlji prouzročiti anomalije u magnetosferi i Zemljinu atmosferu. Prosječna brzina sunčevog vjetra iznosi oko 468 km/s, a gustoća iznosi 8.7 protona/cm³. Ukoliko se radi o velikoj magnetskoj erupciji sa Sunca koje je popraćeno

¹⁹ Campbell H. W. (2003): *op.cit.*, p 122

²⁰ Žic T. (2012): *Eruptivni procesi u Sunčevoj koroni i njihovo širenje heliosferom*, Doktorska disertacija, Zagreb, Hrvatska, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek, p. 9

²¹ *Prominencija*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50647>

sunčevim bakljama i koronarnim izbačajem masa podrazumijeva se da se radi o solarnoj oluji (engl. *Solar Radiation Storm*)²².

2.2 RELEVANTNE ZNAČAJKE GEOPROSTORA

Čestice i energija koje bivaju nošene sunčevim vjetrom imaju izravan utjecaj na Zemljin *geoprostor* – naziv za gornje slojeve Zemljine atmosfere, ionosferske slojeve te magnetosferu.

U promatranju odnosa Sunce – Zemlja i odljevu čestica sa Sunca na Zemlju veliku ulogu zauzima **magnetosfera**. To je područje oko planete koje se nalazi na otprilike 1000 km iznad površine u kojem je magnetsko polje iznimno jako. Radi svoje jačine utječe i na gibanje čestica i plinova koje se unutra nalaze, a nastaje radi međudjelovanja Sunčeva vjetra s magnetskim poljem²³. Sunčev vjetar koji sa sobom nosi i međuplanetarno magnetsko polje (engl. *Interplanetary Magnetic Field* – **IMF**) se kreće prema Zemlji i magnetosferi te nailazi na svojevrsnu granicu koja se zove magnetopauza. Magnetopauza nije uvijek ista oblika i statična, već je radi djelovanja vjetra dinamična i u pokretu. Iako služi kao štit, ono nije stopostotna zaštita od Sunčeva djelovanja; naprotiv mnogo mase, energije, čestica dolazi u područje Zemljina geoprostora²⁴. Područje magnetosfere koje je najbliže Zemljinoj površini zauzima oblik dipola, a što je dalje zauzima nepravilniji oblik (ne-dipolni oblik). Razlog leži u tome što supersoničan udar sunčeva vjetra tlači magnetsko polje na osunčanoj strani zemlje na granici koja se zove magnetski štit (engl. *magnetoshield*, granica između magnetopauze i udara Sunčeva vjetra), a time i razvlači dio koji se nalazi na ne-osunčanoj strani²⁵. Vizualna usporedba može se napraviti sa kamenom koji se nalazi u rijeci u kojoj struji voda. Na temelju toga može se podijeliti na: vanjsku i unutarnju²⁶. Uz Zemljinu atmosferu nalazi se i područje hladne i guste plazme čije je rotacija usporedna sa Zemljom – plazmosfera (engl. *Plasmosphere*)²⁷. Građena je uglavnom od vodika i helija. Posebna je po tome što se vrlo često poklapa sa Van Allenovim radijacijskim pojasevima i prsetanstom strujom (engl. *ring current*)²⁸. Van Allenovi radijacijski pojasevi su pojasevi magnetosfere oko Zemlje te su ispunjena česticama nabijenim električnim

²² Žic A. (2018): *Strukturna analiza odstupanja položaja određenih satelitskim navigacijskim sustavom GPS uslijed učinaka svemirskog vremena*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka, p.37

²³ *Magnetosfera*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.,online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=38044>

²⁴ *Earth's Magnetosphere*, Space Weather Prediction Center, National Oceanic And Atmospheric Administration,online: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere>

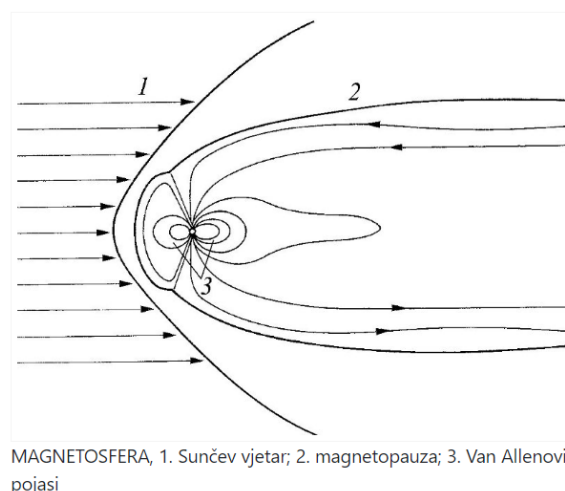
²⁵ *Earth's Magnetosphere*, op.cit.

²⁶ M.Moldwin (2008): *An Introduction to Space Weather*, Department of Earth and Space Sciences, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, Cambridge University Press, p. 52

²⁷ M.Moldwin (2008): op.cit.,p 53

²⁸ M.Moldwin (2008): op.cit.,p 53

nabojem te se gibaju velikim brzinama upravo radi magnetskog polja²⁹. Uz Van Allenove prstenove i prstenastu struju karakterizira velika količina čestica čija energija može iznositi do 20 KeV. Ime je dobila po tome što nabijene čestice stvaraju struju (engl. *electric current*) koja kruži oko Zemlje³⁰.



Slika 9. Zemljina magnetosfera
Izvor: <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=38044>

Konačno, uz magnetosferu te gornje dijelove Zemljine atmosfere pod utjecajem Sunčevih aktivnosti je i **ionosfera**, otprije poznata i po nazivu *Heavisideov* pojas.

2.2.1 Osnovne dinamike ionosfere

Pitanje o postojanju određenog sloja u Zemljinoj atmosferi putem kojega se mogu odaslati radiovalovi na dulje relacije postavlja se već 1899. kada je Nikola Tesla emitirao radiovalove i dvije godine kasnije, 1901. godine, kada je Guglielmo Marconi uspostavio prvu trans-Atlansku radio vezu. Upravo ti događaji predstavljaju početak u istraživanju ionosfere kao i „kamen temeljac“ u posebnoj grani znanosti koja će biti usmjerena na istraživanje fenomena uspostavljanja komunikacije na duže relacije.

Ionosfera jest ionizirani sloj atmosfere smješten na udaljenosti od otprilike 50 pa sve do 1000 km iznad Zemljine površine³¹. Općenito ionizacija je proces u kojemu atom ili molekula dobiva pozitivni ili negativni naboj otpuštajući ili dodavajući jedan (ili više) elektron iz njihove

²⁹Van Allenovi pojasi, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.,online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69650>

³⁰ M.Moldwin (2008): *op.cit.* 53

³¹ Brčić D. (2015): *op.cit.*23

strukture. Izvori ionizacije u zemljinoj atmosferi su prvenstveno solarno ultraljubičasto zračenje ili pak ionizirane čestice solarnog vjetra. Najznačajniji i najčešći proces ionizacije naziva se fotoionizacija (engl. *Photoionisation*)³² – proces ionizacije nastalom radi reakcije s fotonom (sunčevom svjetlosti). Općenito se ona može zapisati na sljedeći način³³:



Gdje su:

A – molekula koja apsorbira energiju iz fotona

hf – energija iz fotona ($E = hf$)

h – Planckova konstanta

f – frekvencija elektromagnetskog zračenja

A^* – novo energetska stanje molekule (engl. *Excited Molecular Energy State*)

Elektroni iz atoma i molekula plina bivaju izbačeni radi ulaska i reakcije s fotonom nastalo ultraljubičastim (engl. *Ultraviolet* - UV) i energetskim solarnim (skrać. X) zračenjem. Kako je nastanak ionosfere direktno povezana sa Suncem i njenim zračenjem, dalo bi se zaključiti da na strani Zemlje koja nije osunčana nema ionosfere – što uopće **nije** točno. Naime, na strani na kojoj nema direktna Sunčeva zračenja dolazi do drugog procesa koji se naziva rekombinacija (engl. *Recombination*). Na „tamnoj“ strani dolazi do procesa rekombinacije iona i elektrona, a trajanje toga procesa jest uspoređan sa Zemljinom rotacijom. Radi toga na strani na kojoj nema izravnog Sunčevog zračenja postoji sloj ionosfere, ali „tanji“ nego kada je pod direktnim utjecajem Sunca.

Raspodjela atmosferskih čestica nije na svim nadmorskim visinama jednaka (što znači i da procesi ionizacije onda isto tako nisu jednaki), a različite vrste zračenja ne dopiru do istih visina. Energetsko zračenje prodire do nižih visina dok ultraljubičasto prodire samo do viših slojeva³⁴. Radi toga, na dnevnoj strani Zemlje, ionosferu se može podijeliti na sljedeće slojeve³⁵:

- ❖ D sloj (50-90 km)
- ❖ E sloj (90-120 km)
- ❖ F1 sloj (140-210 km)

³² M.Moldwin (2008): *op.cit.*,p 71

³³ M.Moldwin (2008): *op.cit.*,p 77

³⁴ Brčić D. (2015): *op.cit.* 23

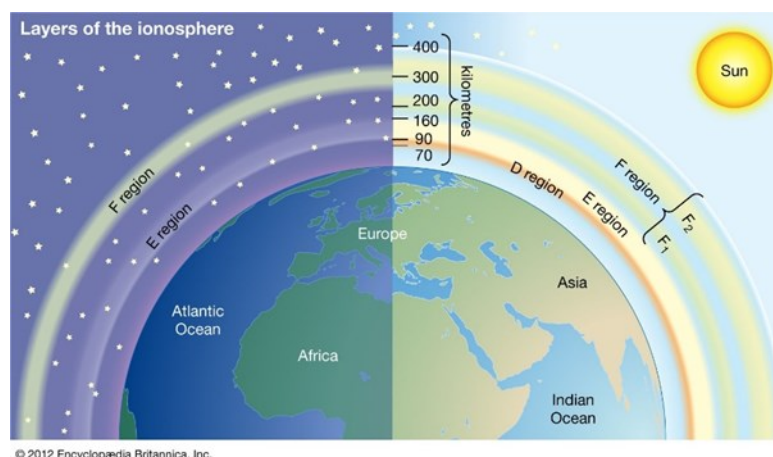
³⁵ M.Moldwin (2008): *op.cit* 72

❖ F2 sloj (210 – 1000)

Naspram dnevne strane Zemlje, na noćnoj strani ionosfera se sastoji od samo dva sloja:

- ❖ E sloj
- ❖ F2 sloj

Uz te slojeve, unutar ionosfere pojavljuju se još tri tzv. **kratkoročna** pojasa: SE (engl. *Sporadic E* – područje visoke ionizacije unutar E sloja), SF (engl. *Sporadic F* – pojas unutar F2 sloja koji nastaje kao posljedica difuzije) te F3 pojas (na visinama iznad 500 km).



Slika 10. Ionosfera i njeni pripadajući slojevi
Izvor: <https://www.britannica.com/science/ionosphere>

U prvom sloju, **D** sloju, ionosfere, proces ionizacije nastaje (fotonima) UV zračenjem na molekulama dušičnog oksida (NO). U ovom sloju proces rekombinacije je vrlo velik što rezultira tome da nestaje noću³⁶. **E** sloj ionosfere nastaje ionizacijom molekule kisika (O₂) prilikom X i UV zračenja. No, uz X i UV zračenje, izvor ionizacije u ovom sloju može biti i efekt neutralne atmosfere (engl. *Neutral Atmosphere Motion*), električno polje auroralnih područja (engl. *Auroral Electric Field*) te ulazak meteora koji izgaraju na tim visinama. Navedene pojave mogu tvoriti kratkoročan sloj **SE**. Posljednji, najgušći sloj ionosfere je **F** sloj. F sloj nastaje ionizacijom ekstremnim UV zračenjem (engl. *Extreme Ultraviolet radiation* – **EUUV**) na atome kisika. Ovaj se sloj smanjuje noću, no ne nestaje u potpunosti kao D sloj jer na velikim visinama proces rekombinacije je daleko manji te se sastoji od atoma kisika (O), ne kao u nižim slojevima gdje se kisik nalazi u molekularnom obliku (O₂). Općenito vrijedi i da je proces rekombinacije atoma mnogo manji nego rekombinacija molekula. F sloj se za vrijeme

³⁶ M.Moldwin (2008.): *op.cit* 72

dana „rasteže“ u dva sloja. Razlog tomu je što se proces fotoionizacije povećava sa visinom. Na kraju potrebno je spomenuti da iznad sloja F počinje tzv. **gornja ionosfera** (engl. *Topside Ionosphere*)³⁷. Gornja ionosfera proteže se od krajnje granice sloja F2 i završava na mjestu gdje počinje sloj plazmosfere. Karakterizira ju smanjenje količine elektrona prema plazmosferi gdje počinje prijelaz iz teških iona O^+ koji dominiraju pri nižim F slojevima u lakše H^+ i He^+ ione³⁸.

Utjecaji sa Sunca na ionosferu i na njeno ponašanje nije jednako na svim zemljopisnim širinama. Stoga, ionosferu možemo i grubo podijeliti dodatno na tri područja:

- I. Ionosfera niskih geografskih širina (0° - 20° sjeverne i južne geografske širine)
- II. Ionosfera srednjih geografskih širina (20° - 60° sjeverne i južne g. širine)
- III. Ionosfera visokih geografskih širina (60° - 90° sjeverne i južne g. širine)

2.2.2 Ionosfera pri Zemljinim polovima

Područja ionosfere na visokim geografskim širima (engl. *High Latitude Ionosphere*) nazivaju se još i **Auroralna** područja po istoimenim fenomenima *Aurora Borealis* (pri sjevernom geografskom Zemljinom polu) te *Aurora Australis* (pri južnom Zemljinom geografskom polu).

Kod ionosfere koja se nalazi pri polovima potrebno je spomenuti fenomen polarnih kapa (engl. *Polar Cups*). To su dijelovi na krajnjem jugu i sjeveru Zemlje koji su direktno spojeni o magnetopauzu³⁹. One imaju jako veliki utjecaj na prodor čestica sa Sunca jer služi poput „tunela“ između ionosfere i svemirske okoline.

Pri nižim i srednjim geografskim širinama na Zemlji geomagnetsko polje nije vertikalno kao kod područja na višim geografskim širinama⁴⁰. Upravo to dovodi do toga da su procesi ionizacije *a priori* mnogo kompleksniji na polovima, nego primjerice u području ekvatora. Magnetske silnice spajaju ionosferu polarnih područja sa vanjskim dijelom magnetosfere dok

³⁷ M.Moldwin (2008.): *op.cit* 73

³⁸ Pignalberi, A., et al. (2020): *On the Analytical Description of the Topside Ionosphere made by NeQuick: Modeling the Scale Height through COSMIC/FORMOSAT-3 Selected Data*, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, PP. 1-1. 10.1109/JSTARS.2020.2986683, online: https://www.researchgate.net/publication/340802871_On_the_Analytical_Description_of_the_Topside_Ionosphere_made_by_NeQuick_Modeling_the_Scale_Height_through_COSMICFORMOSAT-3_Selected_Data

³⁹Lummerzheim, Dirk. (2009): *High-latitude ionosphere: Particle precipitation*, in "Characterizing the ionosphere", online: https://www.researchgate.net/publication/233408434_High-latitude_ionosphere_Particle_precipitation_in_Characterizing_the_ionosphere

⁴⁰ Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003.); *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*, Cambridge University Press, p.3

je ionosfera iznad srednjih i nižih geografskih širina silnicama pod utjecajem unutrašnjeg dijela magnetosfere. Ionosfera auroralnih područja je vrlo dinamična jer je pod izravnim utjecajem Sunčeva vjetrova (polarne kape) koji može podosta varirati te je u njemu općenito izraženiji proces ionizacije nego u ionosferi srednjih i niskih geografskih širina. U ionosferi auroralnih područja zato dolazi i do nastanka kratkoročnog (sporadičnog) pojasa SE.

Ako se ne promatra ionosfera generalno, već zasebno po svakom sloju (od E do F), može se zaključiti se unutar svakoga sloja pojavljuju određene specifičnosti koje su karakteristične samo za područja oko Zemljinih polova. Počevši od najvišeg sloja F, uočljivo je lagano povećanje gustoće elektrona te pojava fenomena zvane zakrpe (engl. *patches*) i mrlje (engl. *blobs*)⁴¹. Mogu biti veličine od 50 do 1000 km, a specifične su po tome što je gustoća plazme vrlo visoka⁴². Razlika između zakrpe i mrlje je u mjestu nastanka; ukoliko nastane iznad polarne kape radi se o *zakrpi*, a ukoliko nastane van polarne kape naziva se *mrlja*. Srednji sloj, E, specifičan je radi pojave koja se naziva Aurora i sporadičnog sloja SE⁴³. Aurora kada se pojavi na nebu izgledom podsjeća na svijetleće zelene zavjese koje se mogu prostirati do nekoliko tisuća kilometara u dužini i nekoliko stotina metara u širini. One su vizualan prikaz vrlo brzih naleta elektrona u gornjim dijelovima atmosfere. Magnetsko polje tada usmjerava vrlo brze elektrone prema polovima gdje dolazi do sudaranja sa atomima i molekulama kisika i dušika. Elektroni u trenutku udarca o atom prenose energiju koja izaziva pobuđeno stanje atoma, a kada pobuđeno stanje atoma prestaje te se stanje energije spušta - tada isti ti atomi otpuštaju višak energije u vidu svijetla⁴⁴. Pojava sporadičnog sloja E (koji se pri višim geografskim širinama zove i *auroralni sporadični sloj E*) korelira sa pojavom aurora jer je isto tako povezana sa prodoranjem elektrona, odnosno općenito čestica sličnih energetske razine (engl. *particles of similar energies*). U ovome se ionosferskom sloju radi velikog mlaza elektrona (engl. *electrojets*) proizvede i Joulova toplina (engl. *Joules heating*) te Lorenzova sila (engl. *Lorenz forces*) koji skupa stvaraju atmosferske gravitacijske valove (engl. *Atmospheric Gravity Waves* – AGWs) radi kojih nastaju putujući ionosferski poremećaji (engl. *Traveling Ionospheric Disturbances* – **TIDs**)⁴⁵.

⁴¹ Crowley G., et. al. (2000): *Transformation of high-latitude ionospheric F region patches into blobs during March 21, 1990., storm*, Journal of Geophysical Research, Vol. 105., No. A3, Pages 5215-5230., p. 5215

⁴² Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003): *op.cit.* 244

⁴³ Danilov A.D., Lastovička J. (2001): *Effects of geomagnetic storms on the Ionosphere and atmosphere*, International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, Vol.2, No.3, Pages 209-224, p. 215

⁴⁴ Aurora, Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, online: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/aurora>

⁴⁵ Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003); *op.cit.* 333



Slika 11. Aurora Borealis

Izvor: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/aurora>

Posljednji sloj D u sjevernim i južnim polarnim područjima vrlo je specifičan po propagaciji radiovalova (što ne isključuje činjenicu da priroda ostalih slojeva ne djeluje na propagaciju radiovalova). U području sloja D dolazi do vrlo važnih pojava koji se nazivaju auroralne apsorpcije radiovalova (engl. *Auroral Absorption – AA*) i apsorpcija iznad polarnih kapa (engl. *Polar-Cap Absorption – PCA*). Obje pojave upućuju na to da se radi o nekoj vrsti smetnje u prolasku radiovalova u auroralnim područjima, odnosno kako ime navodi, da „apsorbiraju“ radiovalove koji prolaze na visini D sloja ionosfere stvarajući tako zone u kojima je signal vrlo slab te čak i onemogućen. Ono što razlikuje AA od PCA je da PCA nastaje iznad polarnih kapa te se javlja radi protona sa Sunca obično kada je Sunčeva aktivnost vrlo jaka⁴⁶. AA pak se javlja radi povremenih elektrona koji dolaze iz magnetosfere u periodima kada se pojavljuje aurora⁴⁷.

Vrlo je važno sagledati ponašanje ionosferskih morfoloških cjelina zasebno na polovima kako bi se mogla dobiti opća ideja o mediju kroz koje prolazi satelitski signal kada putuje na relaciji satelit – prijamnik.

⁴⁶ Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003); *op.cit.* 339

⁴⁷ Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003); *op.cit.* 339

2.2.3 Propagacija signala kroz ionosferu

Pri satelitskom određivanju položaja, signal koji putuje ka prijammniku **kasni**, a uzrok kašnjenja jest količina slobodnih elektrona unutar ionosfere (engl. *Total Electron Content* – **TEC**). TEC je naziv za ukupnu količinu slobodnih elektrona koju zateče satelitski signal na putu prema korisniku⁴⁸. Izračunava se na način da se promatra količina elektrona u jednom cilindričnom presjeku veličine 1m^2 ⁴⁹.

$$TEC = \int N_e(h)dh \quad (7)$$

Gdje je:

N_e – gustoća elektrona u cilindričnom presjeku

h – visina iznad Zemljine površine

Za količinu elektrona, TEC, kao mjernu jedinicu koristi se *TEC jedinica* koja iznosi 10^{16} elektrona/ m^2 . Prilikom analize količine elektrona u ionosferu pogrešno je tvrditi da je TEC uvijek jednakog iznosa; proces ionizacije ovisi o puno parametara što naravno tako utječe i na TEC. Najveća koncentracija slobodnih elektrona nalazi se na visinama od 250 i 400 km, od čega se 2/3 nalazi na visinama koje odgovaraju F sloju ionosfere⁵⁰. Količina slobodnih elektrona ovisi i o dobu dana. Rastom Sunčeve radijacije tijekom dana dolazi i do porasta količine elektrona. Sukladno k tome dolaskom noći dolazi do opadanja količine slobodnih elektrona.

Uzevši količinu elektrona u obzir te činjenicu da pogreška kašnjenja signala ovisi i o frekvenciji, fazi te kodu i brzini dolazi se do izraza za kašnjenje satelitskog signala u kojem je jasno da je pogreška kašnjenja **proporcionalna** sa ukupnom količinom elektrona⁵¹.

$$\Delta\tau_g = \frac{40.3 \times TEC}{cf^2} \quad (8)$$

⁴⁸ L, Kersley et.al.(2004); *Total electron content - A key parameter in propagation: Measurement and use in ionospheric imaging*. Annals of geophysics = Annali di geofisica. 47. 1067-1091. 10.4401/ag-3286., p. 1068, online: https://www.researchgate.net/publication/50301748_Total_electron_content_-_A_key_parameter_in_propagation_Measurement_and_use_in_ionospheric_imaging

⁴⁹ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing, p. 179

⁵⁰ Brčić D. (2015): *op.cit.* p. 29

⁵¹ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *op.cit.* p.566

Gdje je:

c – brzina širenja signala

f – frekvencija signala

TEC – ukupni sadržaj elektrona

Na TEC vrijednosti utječe i upadni kut signala koji dolazi sa satelita, no prije toga potrebno je istaknuti da se prilikom istraživanja propagacije signala koristi određeni 2D model ionosfere kojemu se ona pojednostavljuje. Taj se model zove model ljuske (engl. *Shell model*), a mjesto u kojem signal siječe ionosfersku ljusku zove se ionosferska točka (engl. *Ionospheric Point*). Tada se visina ionosfere uzima na visini od 350 m iznad Zemljine površine⁵².

Lako se daje zaključiti da se pri povećanju zenitnog kuta povećava i ionosfersko kašnjenje; dolazi do produljenja duljine puta signala između satelita te prijamnika smještena na površini Zemlje. Stoga u promatranju promjene TEC jedinica naspram upadnog kuta pojavljuju se dvije veličine: ukupni sadržaj elektrona pri različitim elevacijskim kutevima prijama signala (engl. *Slant Total Electron Content* – **STEC**) i vertikalna udaljenost ukupnog sadržaja elektrona (engl. *Vertical Electron Content* – **VTEC**)⁵³. Za usporedbu rezultata o proračunu TEC jedinica u modelu ljuske vrijednosti se moraju svesti na referentne vertikalne vrijednosti putem metode preslikavanja (engl. *Mapping Function*- **M(E)**).

$$M(E) = \frac{STEC}{VTEC} \quad (9)$$

Uz to također vrijedi i da:

$$STEC = \int n_e(s) ds \quad (10)$$

$$VTEC = \int n_e(h) \sec z_s dh \quad (11)$$

Gdje su:

⁵² Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017): *op.cit.* p.185

⁵³ Brčić D.(2015.):*op.cit.* p. 31

n_e –gustoća elektrona

s –duljina puta signala

z_s –zenitni kut signala u ionosferskoj točki

Zenitni kut odaslanog signala iz satelita može se dobiti izrazom⁵⁴:

$$\sin z_s = \frac{R_o}{R_o + h_1} \times \sin z \quad (12)$$

Gdje su:

z_s –zenitni kut signala u ionosferskoj točki

R_o –radijus Zemlje

h_1 –visina ionosferske ljuske

z –zenitni kut prijamnika

Pitanje koje se uvelike nameće je: *Postoje li metode kojima se može dobiti količina slobodnih elektrona?* Odgovor na to pitanje leži u nekoliko mogućnosti kojima se pruža otkrivanje količine slobodnih elektrona u ioniziranim slojevima Zemlje⁵⁵:

- ❖ Ionosonde (zemaljske i satelitske)
- ❖ Koherentni i nekoherentni radari s raspršenim nizom
- ❖ Mjerenje s LEO satelitima (engl. *Low Earth Orbit* – **LEO**, sateliti na niskoj orbiti)
- ❖ Raketna i in-situ mjerenja niskih ionosferskih slojeva
- ❖ GPS dvofrekvencijska opažanja

Mjerenje ionosondom temelji se na kritičnim frekvencijama ionosferskih slojeva. Kritične frekvencije je najviša frekvencija pri kojoj dolazi do odbijanja signala. Koherentnim i nekoherentnim radarima (engl. *Incoherent Scatter Radio* – **ISR**) moguće je dobiti cjelokupni profil ionosfere odašiljući radarske signale na frekvencijama većih od kritičnih. LEO satelitima moguće je koristeći metode Faradayeve rotacije ili pak putem Dopplerove tehnike dobiti količinu slobodnih elektrona. Posljednja metoda dobivanja količine slobodnih elektrona

⁵⁴ Žic A. (2018): *op.cit.* p. 44

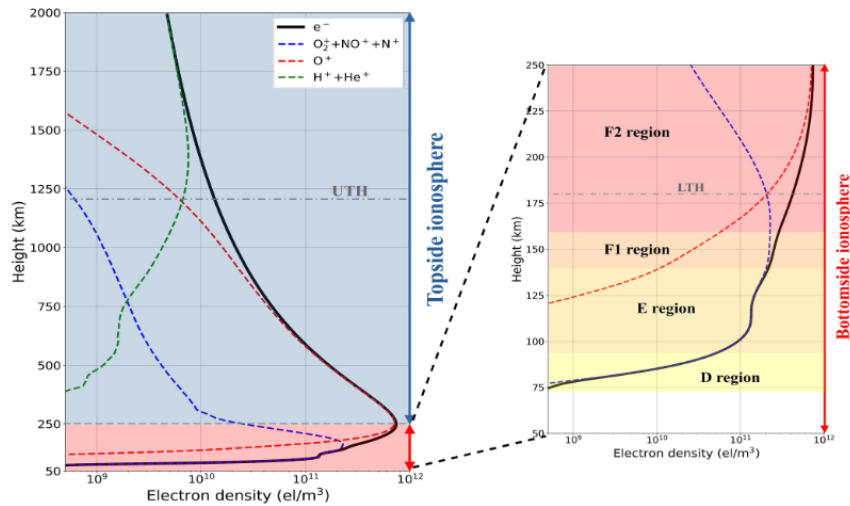
⁵⁵ Brčić D. (2015): *op.cit.* 50

zasniva se na dvofrekvencijskim GPS opažanjima. Dobivanje količine elektrona dvofrekvencijskim prijamnicima odvija se u dva koraka. U prvom koraku se temeljem indeksa disperzije (engl. *refraction indeks*) računa ionosfersko kašnjenje te procjenjuju fazna izravnavanja (engl. *phase leveling*). Uz to javlja se i odstupanje između satelita i GPS prijarnika koje se zove inter-frekvencijsko odstupanje (engl. Inter-Frequency Bias – **IFB**). U drugom koraku počinje se sa modelom ljuske ionosfere kojoj je visina na 400 metara što odgovara sloju F2 radi najveće gustoće elektrona. U drugom koraku odvija se i pretvorba STEC u VTEC na temelju čega se dolazi do rezultata o količini slobodnih elektrona⁵⁶. Ovaj pristup računanja elektrona na temelju dvofrekvencijskih GPS opažanja izdan je 2003. godine u Japanu na Sveučilištu grada Tokyo.

Na temelju podataka o elektronima koji se baziraju na dugogodišnjim statističkim analizama sa Zemlje i iz svemira danas je u upotrebi jedinstven model ionosfere kojega su jednoglasno usuglasili Međunarodna Organizacija za Standard (engl. *International Standardization Organization* – **ISO**), Međunarodno udruženje za radio znanosti (engl. *International Union of Radio Science* – **URSI**), Međunarodni odbor za svemirska istraživanja (engl. *Committee on Space Research* – **COSPAR**) te Europska suradnja za standardizaciju u svemiru (engl. *European Cooperation for Space Standardization* – **ECSS**)⁵⁷. Jedinstveni model naziva se međunarodna referentna ionosfera (engl. *International Reference Ionosphere* – **IRI**) te pruža mjesečne vrijednosti o gustoći elektrona kao i prosječne temperature slojeva.

⁵⁶ Zhang Y., et al (2003): *TEC Measurement By Single Dual-Frequency GPS Receiver*, Tokyo University of Mercantile Marine, Tokyo, Japan, online: https://www.researchgate.net/publication/268009595_TEC_Measurement_By_Single_Dual-frequency_GPS_Receiver

⁵⁷ Bilitza D., et al (2022): *The International Reference Ionosphere Model: A review and Description of an Ionospheric Benchmark*, *Advancing Earth and Space Science, Reviews of geophysics*, online: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022RG000792>



Slika 12. Ionosferski profil gustoće elektrona na IRI modelu ionosfere

Izvor: Bilitza D., et al (2022): *The International Reference Ionosphere Model: A review and Description of an Ionospheric Benchmark*, Advancing Earth and Space Science, Reviews of geophysics, online:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022RG000792>

Na temelju IRI modela ionosfere zaključuje se da je najveća gustoća elektrona u F2 sloju ionosfere. Gustoća elektrona pomoću IRI modela opisana je pomoću koeficijenta debljine donjeg sloja te koeficijenta oblika te se može izraziti putem sljedećeg izraza⁵⁸:

$$N_e = NmF2 \times \frac{\exp(-Z^{B_0})}{\cosh(Z)} \quad (13)$$

$$\text{gdje se } Z \text{ može izraziti preko koeficijenta oblika: } Z = \frac{hmF2 - h}{B_1} \quad (14)$$

Gdje su:

N_e –gustoća elektrona

$NmF2$ –najveća gustoća elektrona u F2 sloju ionosfere

B_0 –koeficijent debljine donjeg sloja

B_1 –koeficijent oblika

⁵⁸ Pongračić B. (2016): *op.cit.*33

3. GLOBALNI NAVIGACIJSKI SATELITSKI SUSTAV

Globalni navigacijski sustav (engl. *Global Navigation Satellite System* – **GNSS**) je naziv je za konstelaciju satelita koji pružaju informacije za dobivanje položaja na globalnoj ili regionalnoj razini. U GNSS sustav pripadaju globalni sustavi kao što su Europski Galileo, Američki Globalni Pozicijski Sustav (engl. *Global Positioning System* – **GPS**), Ruski *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya* Sustav (krat. **GLONASS**) i kineski BeiDou navigacijski sustav. Uz globalne sustave, u GNSS pribrajaju se i regionalni sustavi kao što su to Quazi-Zenith satelitski sustav (krat. **QZSS**) ili primjerice Indijski Regionalni Navigacijski Sustav (engl. *Indian Regional Navigation Satellite System* – **IRNSS**). Međusobno se sustavi razlikuju po broju satelita, frekvenciji itd.⁵⁹

	GPS	GLONASS	BeiDou	Galileo	QZSS	IRNSS
Orbita	MEO	MEO	MEO,IGSO, GEO	MEO	IGSO, GEO	IGSO, GEO
Broj satelita	31	25	27,3,5	26	3,1	19
Konstelacija	6 orbitalnih ravnina	<i>Walker</i> formacija (24,3,1)	<i>Walker</i> formacija (24,3,1)	<i>Walker</i> formacija (24,3,1)	IGSO	IGSO
Elevacija	56°	64.8°	55°	56°	43°	29°
Pokrivenost	Globalna	Globalna	Globalna	Globalna	Istočna Azija i Oceanija	-30°<φ<50° 30°<λ<130°
Frekvencija (MHz)	L1 1575,42 L2 1227,60 L5 1176,45	L1 1602,00 L2 1246,00 L3 1202,025	B1 1561,098 B2 1207,14 B3 1268,52	E1 1575,42 E5a 1176,45 E5b 1207,14 E6 1278,75	L1 1575,42 L2 1227,60 L5 1176,45 E6 1278,75	L5 1176,45 S 2492,028

Tablica 4. Informacije o sustavima GNSS-a

⁵⁹ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017): *op.cit.* p. 17

Izvor: Izradio autor na temelju knjige Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing te službenih internetskih stranica pojedinačnih satelitskih sustava

Generalno sateliti svih navigacijskih sustava nalaze se u srednje visokim orbitama (engl. *Medium-altitude Earth Orbit* – MEO) i imaju globalnu pokrivenost izuzev QZSS i IRNSS sustava. Sateliti sustava BeiDou, QZSS i IRNSS postavljeni su u nagnutu geosinkronu orbitu (engl. *Inclined Geosynchronous orbits* – **IGSO**). Također određeni satelitski sustavi postavljaju svoje satelite u geostacionarnu orbitu (engl. *Geostationary Orbits* – **GEO**). MEO sateliti obično su raspoređeni jednako duž kružne orbite u pravilno razmaknutim orbitalnim ravninama tvoreći tako formaciju naziva *Walker*. Walker formacija izražena je sa tri broja; tripletom $t/p/f$ gdje su⁶⁰:

t – ukupan broj satelita

p – broj jednako udaljenih ravnina

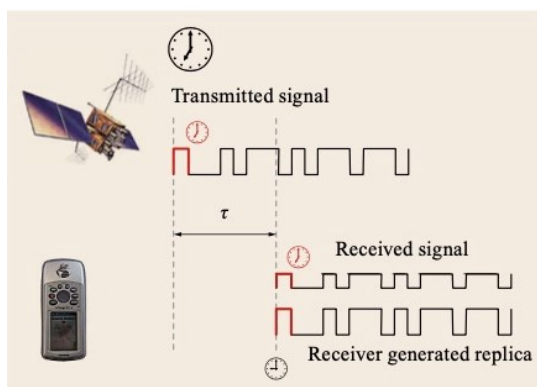
f – fazna udaljenost među orbitalnim ravninama

Signali iz GNSS satelita elektromagnetski su valovi čija je brzina propagacije jednaka brzini svjetlosti. Specifičnost signala koji su odašiljani sa satelita je ta da val nosilac (engl. *Carrier*) sa sobom nosi karakteristični kod koji se zove pseudonasumčni kod (engl. *Pseudorandom Code* – **PRN kod**)⁶¹. PRN kod je binarnog oblika (0,1) koji se kontinuirano šalje u intervalima od nekoliko milisekundi kako bi se mogla precizno izmjeriti udaljenost satelita. Taj kod je jedinstvena oblika kako ne bi dolazilo do zabune prilikom odašiljanja više signala na istoj frekvenciji⁶².

⁶⁰ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *op.cit.* p. 16

⁶¹ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *op.cit.* p. 6

⁶² *Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing*, North Atlantic Treaty Organisation, Research And Technology Organisation, p.a-1, online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA493532.pdf>



Slika 13. Replikacija PRN koda

Izvor: Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing,

Općenito kada se govori o tome koja mjerenja dolaze sa satelita ka prijamniku, GNSS signali daju informacije o tri veličine: pseudoudaljenost (engl. *pseudorange*), faza vala nosioca (engl. *Carrier phase*) i navigacijsku poruku. Te tri veličine pružaju osnove prilikom izračuna položaja korisnika. Pseudoudaljenost je mjera koja izražava razlike u satovima korisnika i sata satelita⁶³.

$$\bar{R}_i = R_i + C\Delta t_{Ai} + C(\Delta t_u - \Delta t_{Si}) \quad (15)$$

Gdje su:

$\bar{R}_i$ – pseudoudaljenost do satelita

R_i – prava udaljenost

C – brzina svijetlosti

Δt_{Ai} – propagacijsko kašnjenje

Δt_u – pomak korisničkog sata od GPS vremena

Δt_{Si} – pomak satelitskog sata od GPS vremena

Za konačno dobivanje položaja GNSS sustavima satelita potrebno je ispuniti i osnovna tri kriterija. **Prvi** je korištenje zajedničkog geoprostornog koordinatnog sustava, **drugi** sustav zajedničkog sustava vremena te **treći**, posljednji, je da je brzina signala konstantna.

⁶³ Kos. S., Zorović D., Vranić D. (2010.): *Terestrička i elektronička navigacija*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka, p.495

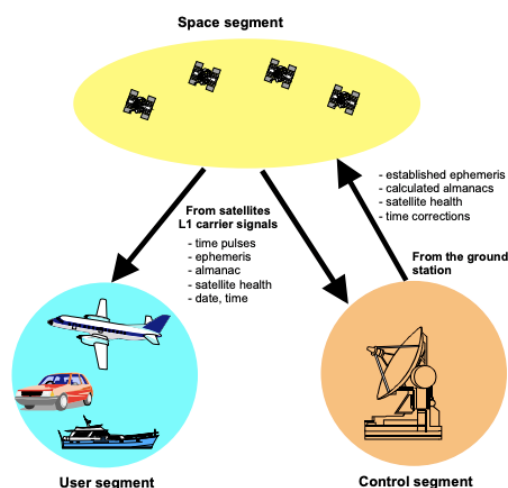
Za potrebe ovog istraživačkog rada analizirati će se samo GPS sustav određivanja položaja.

1.1 Globalni sustav određivanja položaja (GPS)

Globalni sustav određivanja položaja je američki satelitski sustav koji omogućuje precizno određivanje položaja korisnika. Kao i svaki satelitski sustav, sastoji se od tri osnovna segmenta:

- I. Satelitski segment
- II. Kontrolni segment
- III. Korisnički segment

Uz navedena tri korisnička segmenta, u obzir se mora uzeti i prijenosni medij koji uvelike utječe na propagaciju signala. Grafički se njihov odnos može prikazati na sljedeći način:

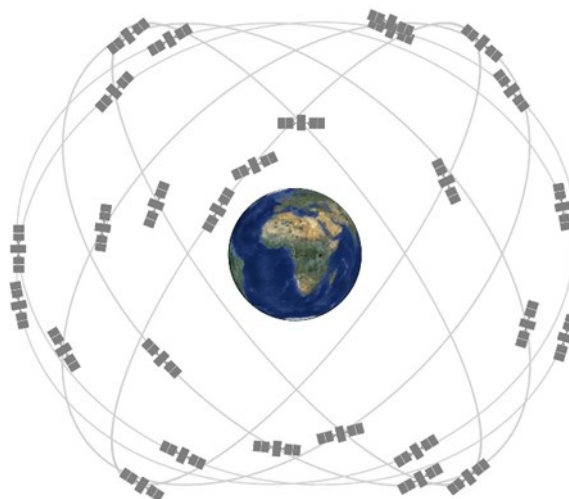


Slika 14. Odnos satelitskih segmenata

Izvor: Zogg, J. (2009). *GPS – Essential of Satellite Navigation*; Compendium: https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf

Prvi segment GPS-a jest **satelitski** segment. Njega čine minimalno 24 satelita raspoređenih u 6 orbitalnih ravnina što znači da se u svakoj ravnini nalaze 4 satelita. Kruže u MEO orbiti na visini od otprilike 20 200 km⁶⁴. Orbitalne ravnine imaju inklinaciju od 55°. Ta formacija satelita te inklinacija omogućuje da „pod okom“ imaju cijelu površinu Zemlje.

⁶⁴ GPS, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics stranica, online: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>



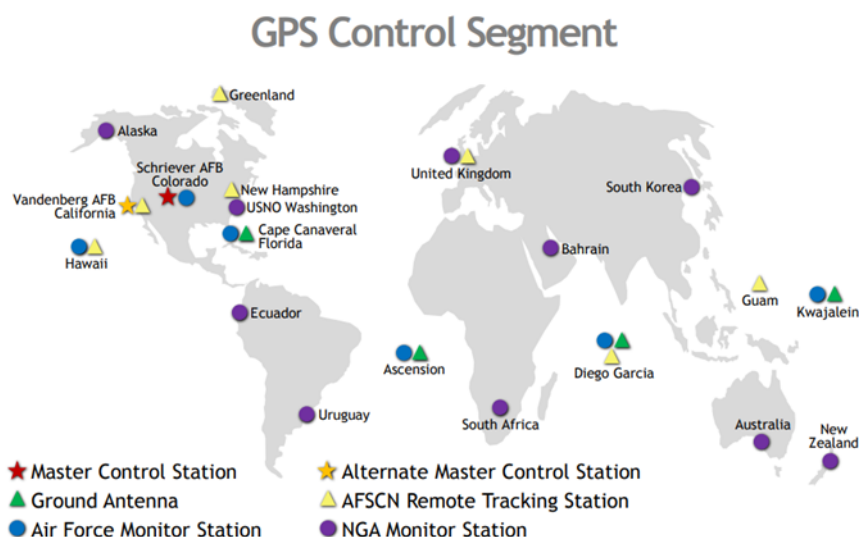
Slika 15. Satelitski segment GPS-a

Izvor: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/>

Period revolucije satelita iznosi 11 sati i 58 minuta (pola sideričkog dana) što znači da svaki satelit dnevno Zemlju obiđe točno dva puta.

Sljedeći segment GPS- jest kontrolni segment i kao što mu i samo ime navodi – osnovna funkcija mu je nadgledanje i praćenje satelita, pratiti njihov rad i izvoditi analize te slati naredbe konstelaciji. Operativni kontrolni segment (engl. *Operational Control Segment* – **OCS**) sastoji se od glavne kontrolne stanice (engl. *Master Control Station*), zamjenska glavna kontrolna stanica (engl. *Alternate Master Control Station*), 11 upravljačkih i kontrolnih antena te 16 stanica za nadzor (engl. *Monitoring Site*)⁶⁵.

⁶⁵ GPS, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics stranica, online: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>



Slika 16. Kontrolni segment GPS-a
 Izvor: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

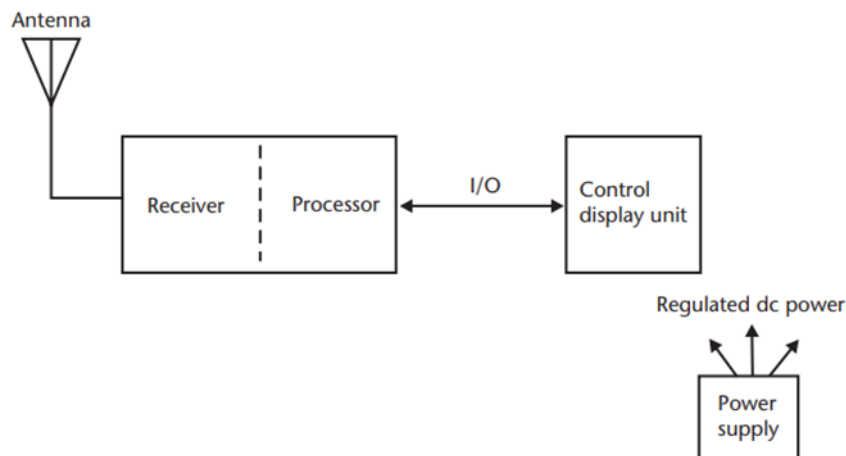
Kontrolne stanice prate GPS satelite koji ih nadilaze, skupljaju navigacijske signale, mjere udaljenosti i atmosferske podatke, a sve to onda šalju glavnoj kontrolnoj stanici. Glavna kontrolna stanica daje naredbe GPS konstelaciji te preko globalne stanice za praćenje (engl. *User Global Monitoring Station*) dobiva informacije o lokaciji. Također je to i stanica koja se brine za održavanje satelita i koja prati bilo kakve anomalije. Ukoliko je potrebna komunikacija sa satelitima, to se odvije putem Zemljanih antena koje šalju komande i slično putujućim satelitima⁶⁶.

Konačni segment GPS sustava je korisnički segment kojega čine sljedeći elementi (iskazani u i idućem grafu)⁶⁷:

- ❖ Antena
- ❖ Prijamnik
- ❖ Procesor
- ❖ Prikaz/Zaslona
- ❖ Izvor napajanja

⁶⁶ GPS, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics stranica, online: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

⁶⁷ Kaplan E.D., Hegarty C. J. (2006.): *Understanding GPS: principles and applications*.—2nd ed., Arctech House, London, Boston, p.104



Slika 17. Pojednostavljeni prikaz korisničke komponente GPS-a
Izvor: https://dl.amobbs.com/bbs_upload782111/files_33/ourdev_584835O21W59.pdf

Antena je element koji omogućuje primanje signala na jednoj ili dvije frekvencije koji su kružno (desno) polarizirani (engl. *Right-Hand Circular Polarised-RHCP*)⁶⁸. Prijamniku je funkcija prijam signala, mjerenje vremena te izračun pseudoudaljenosti, odnosno pružanje informacija o položaju. Prijamnik se sastoji od tri dijela od kojih je prvi radiofrekvencijski segment (engl. *Front End – RF*). U tom se sučelju se odvija filtriranje i pojačavanje signala LNA pojačivačem (engl. *Low Noise Amplifier- LNA*). Nakon toga slijedi analogno-digitalna pretvorba ACD konverterom (engl. *Analog to Digital Converter - ACD*) i na koncu procesuiranje u procesoru⁶⁹.

Korisnici se međusobno mogu podijeliti u dvije skupine, ovisno o usluzi: korisnik standardnih usluga (engl. *Standard Positioning Service – SPS*) i preciznih usluga (engl. *Precise Positioning Service – PPS*). SPS usmjeren je svakodnevne usluge i široko dostupan je standardnim korisnicima dok je PPS namijenjen za usluge institucija i vlada.

3.2 Preduvjeti određivanja položaja

Kako bi lokacija koju korisnik dobiva bila vrlo precizna, GPS sustav mora ispunjavati određene preduvjete u svome radu. Preduvjeti koje GPS mora ispunjavati su:

- I. Zajednički koordinatni sustav
- II. Vremenski standard

⁶⁸ Kaplan E.D., Hegarty C. J. (2006.): *op.cit.* p.103

⁶⁹ Jureković P. (2018.): *Komparativna parcijalna analiza raspršenja položajne točnosti GPS I GLONASS sustava u različitim stanjima svemirskog vremena*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka, p.24

III. Konstantna brzina širenja signala

Kako bi se riješila problematika raznih koordinatnih sustava svi GPS sustavi temelje se na jednom **zajedničkom koordinatnom sustavu** imena WGS-84 (engl. *World Geodetic System*). On je dio Kartezijeva, ECEF sustava (engl. *Earth Center, Earth Fixed*) gdje se položaj objekta (sferne koordinate) dobiva putem Kartezijevih prostornih koordinata (X, Y, Z). Ishodište sustava nalazi se u središtu mase Zemlje. Z os ovoga sustava prolazi središtem Zemljina sjevernog pola, X leži u ekvatorijalnoj ravnini na precjecištu ekvatora i početnog meridijana, a Y os je okomita na X os u smjeru istoka. Na temelju odnosa sfernih koordinata i kvadratnih Kartezijevih koordinata može se izvesti međusobna pretvorba⁷⁰.

φ, λ, h »»» X,Y,Z	X,Y,Z »»» φ, λ, h
$X = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda$	$\varphi = \arctan \frac{Z + e^2 b \times \sin^3 \theta}{p - e^2 a \times \cos^3 \theta}$
$Y = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda$	$\lambda = \arctan \frac{Y}{X}$
$Z = \left(\frac{b^2}{a^2} N + h \right) \sin \varphi$	$h = \frac{p}{\cos \varphi} - N$

Tablica 5. Pretvorba koordinata

Izvor: Izradio autor na temelju knjige Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins I. (1992): *Global Positioning System: Theory and Practice*, Graz, Austria, p. 232

Gdje su:

X, Y, Z – pravokutne koordinate

φ, λ, h – sferne koordinate

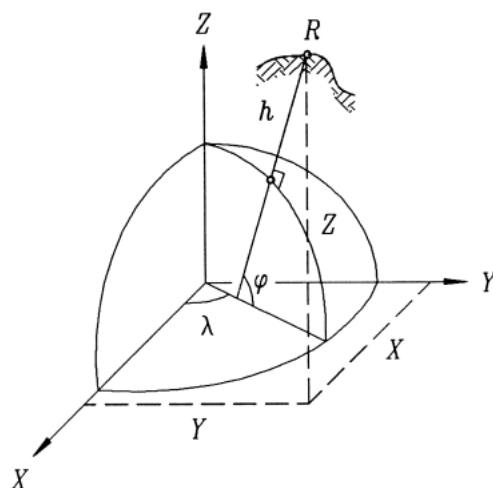
N – radijus zakrivljenosti (engl. *radius of curvature*)

a, b – poluosi odabrane elipsoide (engl. *semiaxes of the reference ellipsoid*)

e – numerički ekscentricitet

Grafički odnos ravnina u WGS-84 sustavu prikazuje se na sljedeći način:

⁷⁰ Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins I. (1992): *Global Positioning System: Theory and Practice*, Graz, Austria, p. 232



Slika 18. Koordinatne osi WGS-84

Izvor: Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins I. (1992): *Global Positioning System: Theory and Practice*, Graz, Austria

Sljedeći preduvjet je zajednički sustav vremena tj. **vremenski standard** koji mora postojati u GPS sustavu. Vrlo je bitno da postoji vremenska usklađenost između GPS satelita te prijamnika na Zemlji jer povećanjem vremenske pogreške sa sobom vuče problematiku točnosti korisnika koji se koristi GPS sustavom. Otprilike 1 nanosekunda može prouzročiti pogrešku u točnosti za 0,30 metara⁷¹. GPS sustavno vrijeme (engl. *GPS Time – GPST*) kontinuirano je i neprekidno vrijeme definirano kontrolnim segmentom na bazi atomskih satova. GPST počelo je sa svojim radom u noći sa 5. na 6. siječanj 1980. godine točno u ponoć. Tada je razlika između UTC-a i GPST iznosila 19 sekundi. Kontrolni segment stoga ima zadatak da ispravlja razliku UTC i GPST vremena te bi u pravilu trebala iznositi 1μs, no u stvarnosti ona se iznosi 25 ns⁷².

Posljednji preduvjet koji GPS mora ispunjavati jest **konstanta brzina širenja signala** za koju se uzima brzina širenja elektromagnetskih valova u vakuumu, a iznosi $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s⁷³.

3.3 Princip rada GPS sustava

Osnovna funkcija svih GPS sustava je pružiti korisniku informaciju o njegovom položaju. Prije nego što se rastumače osnove utvrđivanja položaja potrebno je objasniti pojam **signala**

⁷¹ Kos. S., Zorović D., Vranić D. (2010): *op.cit.* p.497

⁷² J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares (2013): *GNSS Data Processing Volume I: Fundamentals and Algorithms*, Contactivity bv, Leiden, the Netherlands, p.39

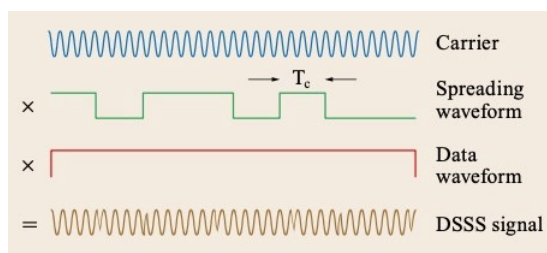
⁷³ GPS, Essentials of Satellite Navigation, Compendium, p. 13. online: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf

koji potječe sa satelita. Signal za utvrđivanje položaja uključuje tri komponente: val nosilac, kodirani signal te navigacijsku poruku.

Signali koji dolaze iz GPS satelita emitiraju se na 3 frekvencije koji se nalaze u L pojasu⁷⁴:

- I. $L1 = 154 \times 10,23 \text{ MHz} = 1575,420 \text{ MHz}$
- II. $L2 = 120 \times 10,23 \text{ MHz} = 1227,600 \text{ MHz}$
- III. $L5 = 115 \times 10,23 \text{ MHz} = 1176,450 \text{ MHz}$

Svi signali koje emitira GPS satelit su desno kružno polarizirani, a frekvencija su izvedene na temelju osnovne (engl. *fundamental*) frekvencije iznosa 10.23 MHz. Signali L1 i L2 generirani su konceptom raspršenog spektra s izravnim nizom (engl. *Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS*). Signali koji su na taj način generirani nastali su kao rezultat tri komponente: nosilac radio frekvencije (engl. *Radio Frequency Carrier – RF*), valni oblik podataka (engl. *Data Waveform*), valni oblik širenja (engl. *Spreading Waveform*).



Slika 19. Koncept raširenog spektra s izravnim nizom (DSSS)

Izvor: Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing, p. 206

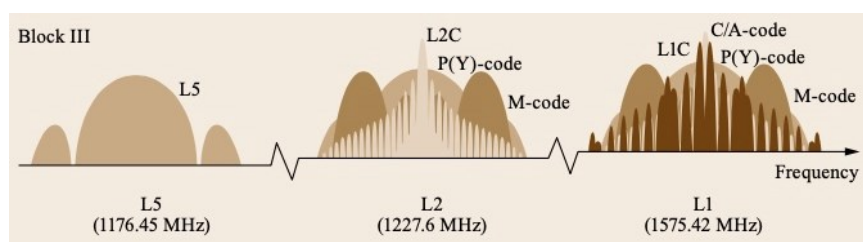
Svaki satelit na sebi sadrži PRN kod te može imati određene modulacije. Za valove nosilaca L1 i L2 u upotrebi su dvije modulacije, a to su:

- I. C/A (engl. *Coarse/Aquisition*) kod
- II. P (engl. *Precision*) kod

C/A modulacija sadrži 1023 bita te se ponavlja svake milisekunde. On je glavni signal kod SPS korisnika i odašilje se samo na L1 frekvenciji. Druga modulacija je P kod te je namijenjena uglavnom samo PPS korisnicima. Mnogo je duži te se emitira mnogo brže nego C/A kod. Za razliku od C/A koda, ovaj se kod odašilje na obje frekvencije – i L1 i L2. P kod kriptiran upravo toga što nije namijenjen SPS korisnicima, a ta se uloga zove A/S (engl. *Anti –*

⁷⁴ J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares (2013.): *op.cit.* p. 19.

Spuffing – Anti-Prijevara). Kriptiranjem ovaj P kod mijenja svoje ime u Y kod, a posebni prijamnici koje koriste institucije naziva se P/Y prijamnik. Uz kriptiranja, do ukinuća od strane predsjednika SAD-a, postajala je S/A opcija (engl. *Selective/Ability* – Selektivna/Mogućnost) kojima se moglo degradirati C/A signal ili pak dodati pogrešku u emitiranim efemeridama. Isprva su se koristile samo L1 i L2 frekvencije, no modernizacijom sustava u uporabu nastupa i treća L5 frekvencija⁷⁵. Uz uporabu nove L5 frekvencije, nešto ranije, na snagu stupaju i dva nova signala sa M modulacijama (M modulacija za vojne službe na L1 i L2 frekvenciji) te nova L2C modulacija za svakodnevne korisnike na L2 frekvenciji. Nekoliko godina kasnije uz L5 frekvenciju dolazi i posljednja modulacija L1C na L1 frekvenciji za svakodnevne korisnike. Nove modulacije signala na L1 i L2 frekvencijama te frekvencija L5 nazivaju se moderni GPS signali (engl. *modernized GPS signals*) te za razliku od prvobitnih signala na L1 i L2 sadrže i nove značajke kao što su duži PRN kodovi te novije enkripcije navigacijskih poruka⁷⁶.



Slika 20. Prikaz GPS signala odašiljanih na pripadajućim frekvencijama

Izvor: Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing, p. 206

Za odašiljanje GPS signala koristi se i tehnika kada se na jednoj frekvenciji istovremeno odašilje više signala. Ta se tehnika naziva kodna raspodjela (engl. *Code Division Multiple Access* – **CDMA**)⁷⁷.

GPS satelit dostavlja korisniku navigacijsku poruku koja sebi u sebi sadrži određene informacije. **Navigacijska poruka** koja se odašilje prijamniku u sebi sadrži⁷⁸:

- Vrijeme sustava i podatci o pretvorbi GPS sustava vremena u koordinirano svjetsko vrijeme
- Korekcije sata (s uključenim kašnjenjem satelitske opreme te ispravkom relativističkih učinaka)

⁷⁵ J. Sanz Subirana, J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares (2013.): *op.cit.* p. 20.

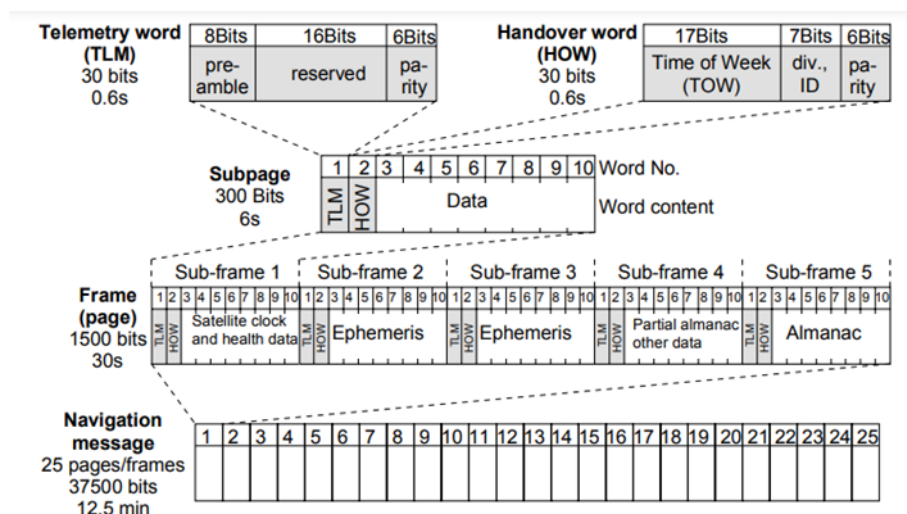
⁷⁶ Teunissen P.J.G., Montebruck O. (2017): *op.cit.* 206.

⁷⁷ Brčić D. (2015): *op.cit.* p. 13

⁷⁸ Grewal S.M., Weill R.L., Andrews A.P. (2001): *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*, A John Wiley & Sons, Inc. Publication, p. 33

- Vlastite efemeride GPS satelita
- Podatke alamanaha GPS satelita koji odašilje satelit
- Stanje satelita i ispravnost
- Parametri ionosferskih modela ispravka kašnjenja signala (za jednofrekvencijske prijamnike)

Podatci poruke šalju se u obliku logično posloženih okvira postavljena na val nosioc. Svaki okvir (engl. *Frame*) je veličine 1500 bita te mu je potrebno oko 30 sekundi da se pošalje. Okviri su podijeljeni dalje u 5 podokvira (engl. *Subframes*) veličine 300 bita. Svakom podokviru potrebno je oko 6 sekundi da se emitira. Da bi se odaslala informacija o alamanahu potrebno je grupirati 25 okvira te mu stoga vrijeme emitiranja iznosi 12.5 minuta. Svaki podokvir također je podijeljen u 10 zasebnih riječi veličine 30 bita (30 riječi x 10 = 300 bita). Svaki podokvir počinje s telemetrijskom riječi i riječi prijelaznim izrazom HOW⁷⁹. Jedna kompletna navigacijska poruka načinjena je od 25 okvira⁸⁰. Grafički prikaz jedne navigacijske poruke vidljiv je na sljedećoj ilustraciji:



Slika 21. Struktura navigacijske GPS poruke

Izvor: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf

Uz definiciju signala i navigacijske poruke potrebno je i u konačnici definirati općenito kako se odvija **postupak određivanja položaja** jednog korisnika GPS sustava. Prvo što je

⁷⁹ Telemetrija je skup sekvenci od 8 bitova koje služe za sinkronizaciju, a HOW riječ je skup od 17 bitova te u sebi sadrži strukturu za započinjanje novog podokvira

⁸⁰ GPS, Essentials of Satellite Navigation, Compendium, p. 56. online: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf

potrebno za utvrđivanje položaja je minimalno 4 satelita koji moraju ispunjavati *preduvjete*. Emitirani signali s navigacijskom porukom dolaze do prijamnika, tj. korisnika, koji izračunava pseudoudaljenosti sa četiri satelita. Uz to potrebno je uzeti i podatak o vremenu s obzirom na odstupanje korisničkog i satelitskog sata. Time se stvara sustav jednadžbi sa četiri nepoznanice⁸¹. Pseudoudaljenost se tada može izraziti⁸²:

$$R = \sqrt{(X_{Si} - X)^2 + (Y_{Si} - Y)^2 + (Z_{Si} - Z)^2} + C\Delta t_{Ai} + C(\Delta t_u - \Delta t_{Si}); i = 1, 2, \dots, 4, \dots \quad (16)$$

Gdje su:

X, Y, Z –prostorna koordinate korisnika

X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si} – prostorne koordinate satelita

Δt_{Ai} –propagacijsko kašnjenje (ostali utjecajni parametri)

$(\Delta t_u - \Delta t_{Si})$ –pogreška korisničkog sata;

Δt_u – odstupanje korisničkog sata

Δt_{Si} –odstupanje sata satelita

C –brzina širenja signala

Satelitsko određivanje položaja, kao i svaki drugi sustav, podložno je pogreškama. Pogreške mogu biti korisničke ili pak izazvane geometrijskom razdiobom točnosti.

Geometrijska razdioba točnosti nastaje uslijed nepovoljne raspodjele satelita koje prijamnik koristi u pri određivanju položaja. Dolazi do povećanja područja neodređenosti položaja korisnika⁸³.

Korisnička razdioba točnosti objedinjuje tri izvora pogreške: satelitsku komponentu, korisničku komponentu i prijenosni medij. Svaki od ove tri komponente može biti izazvano određenim situacijama čime povećavaju korisničku razdiobu točnosti, odnosno ukupnu pogrešku položaja korisnika.

⁸¹ *World Geodetic System — 1984 (WGS-84) Manual*, International Civil Aviation Organization, p. 82, online: <https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ECARAIM/REF08-Doc9674.pdf>

⁸² Kos, S., Zorović D., Vranić D. (2010.): *op.cit.* p 508

⁸³ Brčić D. (2015.): *op.cit.* p.19

KORISNIČKA RAZDIOBA TOČNOSTI		
Satelitska komponenta	Korisnička komponenta	Prijenosni medij
Odstupanja satelitskih satova (uključujući i relativistički učinak)	Terminalni šum prijamnika	Troposfersko kašnjenje
Pogreške u procjeni položaja (efemeride) satelita	Sklopovsko kašnjenje korisničke opreme	Ionosfersko kašnjenje
Sklopovska kašnjenja opreme satelita	Višestruki putovi uslijed odbijanja signala o okolne objekte	

Tablica 6. Korisnička razdioba točnosti

Izvor: Izradio autor na temelju doktorskog rada Brčić, D. (2015): *Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*, Doktorska disertacija, Rijeka, Hrvatska, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet

U ovom radu te u daljnjem istraživanju naglasak će se staviti na korisničku komponentu korisničke pogreške izazvano ionosferskim kašnjenjem. Kod jednofrekvencijskih prijamnika, ova se pogreška može umanjiti uporabom specifična Klobucharevoga modela.

Klobucharev model ispravke za iskaz ionosferskog kašnjenja u sekundama je⁸⁴:

$$T_g = DC + A \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \text{ za } |x| \leq \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

$$\text{gdje se } x \text{ može izraziti kao: } x = \frac{2\pi(t - T_p)}{P} [\text{rad}] \quad (18)$$

⁸⁴ Grewal S.M., Weill R.L., Andrews A.P. (2001): *op.cit.* p. 112

Gdje su:

DC –konstanta od 5ns

T_p –faza = 50.400 s

A –Amplituda

P –Period

t –lokalno vrijeme ionosferske točke

Ovaj model uzima pretpostavku da visina ionosferske ljuske iznosi 350 metara te da ionosferski signal prolazi kroz jednu točku (ionosferska točka). Amplituda i period iskazani su putem polinoma trećeg stupnja i glase:

$$A = \sum_{n=0}^3 \alpha_n \phi_m^n [s] \quad (19)$$

$$P = \sum_{n=0}^3 \beta_n \phi_m^n [s] \quad (20)$$

Gdje su:

α_n, β_n –koeficijenti odaslani sa satelita (koje odašilje satelit)

ϕ_m^n – širina na kojoj se nalazi ionosferska točka

Uz Klobucharev model ispravke, koriste se i dvofrekvencijski prijamnici koji imaju mogućnost automatskog otklona ionosferskog kašnjenja.

4. ISTRAŽIVANJE

U ovom poglavlju prikazana je metodologija korištena pri izradi ovog istraživačkog rada. Za potrebe istraživanja preuzete su podatci o tri referentne stanice smještene na jednom geografskom području, a to je područje na sjevernoj polutci Zemlje pri njenom sjevernom polu.

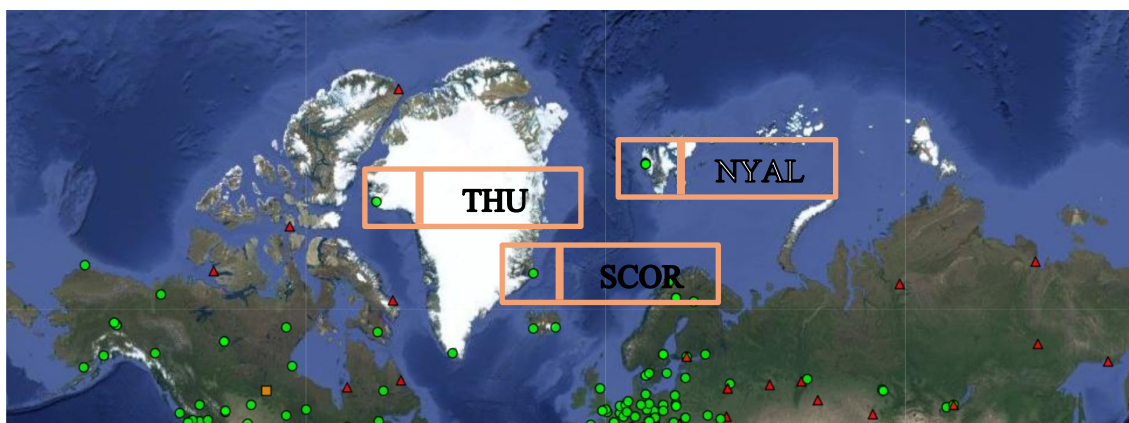
Prilikom istraživanja koristile su se 3 referentne stanice Međunarodnog GNSS servisa (engl. *International GNSS Service* – **IGS**): **Thule Airbase** (THU200GRL), **Scoresbysund/Ittoqqoormiit** (SCOR00GRL) te **Ny-Alesund** (NYAL00NOR).

STANICA	G. ŠIRINA φ	G. DULJINA λ	VISINA h
THU200GRL	76,537	-68,825	36 m
SCOR00GRL	70,485	-21,950	129 m
NYAL00NOR	78,930	11,865	79 m

Tablica 7. Relevantni podatci o referentnim stanicama

Izvor: Izradio autor na temelju službene IGS web stranice: <https://igs.org/network/>

Stanice Ny-Alesund smještena je u Norveškoj na otočju Svalbard, dok su preostale dvije smještene na Grenlandu. Također stanica Ny-Alesund je smještena najsjevernije od sve tri referentne stanice.



Slika 22. Geografski smještaj referentnih IGS stanica

Izvor: Izradio autor na temelju službene IGS web stranice: <https://igs.org/network/>

Prilikom odabira referentnih stanica vodilo se računa o tome da se odrede tri referentne stanice na istom geografskom položaju kako bi se moglo jasno uvidjeti u problematiku odstupanja položaja pri sjevernom polu. Također, vodilo se računa o dostupnosti podataka.

Općenito ovaj diplomski rad podijeljen je u dva dijela: teoretski dio te istraživački. Iduća poglavlja, uključujući i ovo poglavlje, predstavljaju istraživački dio koji je podijeljen u nekoliko pod-poglavlja. Isprva će se prikazati kojim alatima se koristi prilikom obrade podataka nakon čega slijedi poglavlje o promatranome razdoblju; na temelju arhive podataka o stanju svemirskog vremena prikazati će se opće stanje o vremenu u periodu od 15 dana u mjesecu ožujku 2015. godine. Nakon toga slijede rezultati, odnosno statistički podatci te grafički prikazi rezultata. Posljednje poglavlje istraživačkog dijela jest diskusija o dobivenim rezultatima te usporedba s rezultatima prijašnjih istraživanja vezano za istu tematiku – ionosfersko kašnjenje te uporaba Klobuchareva modela ispravke.

4.1 Korišteni alati

Prije uporabe računalnih alata za obradu podataka, potrebno je iste prikupiti te pripremiti za obradu. Sve datoteke prikupljene su iz javnih baza podataka koje su u potpunosti besplatne. Datoteke koje su prikupljene nalaze se u jedinstvenom RINEX formatu (engl. *Receiver Independent Exchange Format* – **RINEX**). Datoteke ovoga formata namijenjene su obradu u pogledu istraživanja satelitskih sustava⁸⁵. Nakon pristupa bazi podataka te prikupljanja dviju vrsti datoteka potrebno je kreirati položajne zapise. Te dvije vrste datoteka su *opservacijske* (npr. scor0690.15d) datoteke koje u sebi sadrže podatke vezane za mjerenje prijamnika na nekoj lokaciji te *navigacijske* (npr. brdc0830.15n) datoteke koje u sebi sadrže informacije na razini sustava, primjerice stanje satelita ili pak koeficijent ionosferskog modela⁸⁶.

Nakon prikupa podataka kreće se na obradu u računalni programski paket naziva RTKLIB. Njime se dobivaju položajni zapisi s kojima se vrši statistička daljnja obrada. Programski paket omogućuje optimizaciju te svojevrsnu „slobodu“ pri obradu RINEX podataka. Omogućava korisniku da kreira, odnosno da pri kreiranju novih položajnih zapisa

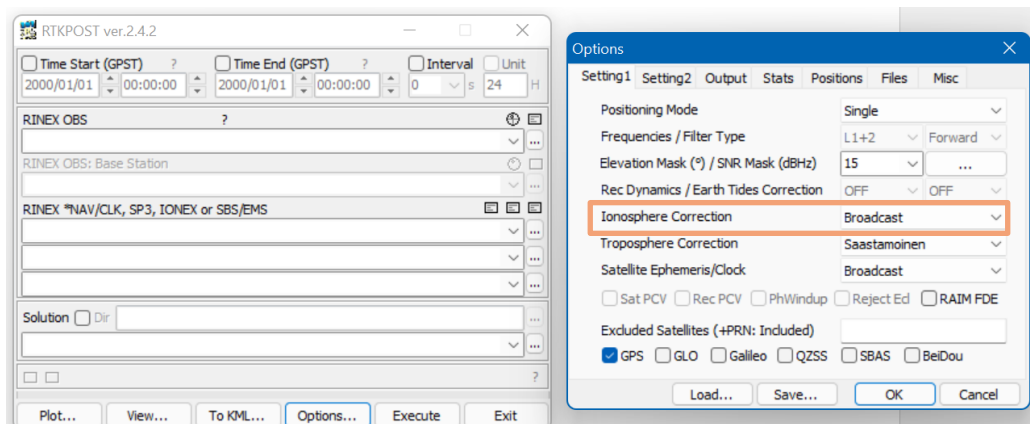
⁸⁵ CCDIS, *NASA's Archive of Space Geodesy Data*, National Aeronautics and Space Administration, online: https://cdsis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/RINEX_Version_3.html

⁸⁶ Baze podataka za opservacijske datoteke i navigacijske datoteke su različite, online:

-opservacijske datoteke: <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/data/>

-navigacijske datoteke: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/standard1.shtml>

mijenja određene parametre kao što su kutevi maskiranja i uključivanje, odnosno isključivanje ionosferskog modela.



Slika 23. Radno sučelje programa RTKLIB
Izvor: Izradio autor na temelju programa RTKLIB

Za ovaj istraživački rad, jedna od glavnih značajki jest uključivanje i isključivanje ionosferskog modela. Njime se dobivaju položajni zapisi prilikom uporabe modela za ispravak ionosferskog kašnjenja (u nastavku teksta naziva ON) te položajni zapisi bez uporabe tog modela (u nastavku teksta s atributom OFF).

RTKLIB programski paket sastoji se od programske knjižnice u kojima se nalaze programi za obradu podataka, AP-ova (engl. *Application programs* – dodatne aplikacije za programe) te priručnika. Za dobivanje konačnih položajnih zapisa unutar samog programa mora se odvijati određeni proces. Prvo je pretvorba vremenskog sustava. Za obradu (GNSS) podataka RTKLIB koristi GPST vremenski sustav (engl. *Global Positioning System Time*). Kako su podatci prije ulaska u RTKLIB iskazani u UTC vremenu moraju biti konvertirani u GPST. GPST je često izražen kao broj tjedana GPS i vrijeme tjedna (engl. *Time of week* – **TOW**) u sekundama od početka epohe u vrijeme 00:00:00 UTC na dan 6. siječanj 1980. godine. Iako je GPST izražen na taj način, RTKLIB nije. Za obradu podataka potrebna je i konverzija između udaljenosti (engl. *Range*) i vremena (engl. *Time*). TOW iznosi u tom slučaju 1.3×10^{10} sekundi što je jednako iznosu od 0.04 m udaljenosti. Stoga, RTKLIB izražava vrijeme kao izraz **gtime_t** koji je definiran sljedećim izrazom⁸⁷:

```
typedef struct {
```

⁸⁷ RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, p. 131, online: https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

```

time_t88 time; /* time (s) expressed by standard time_t */ double sec; /* fraction of
second under 1 s */
} gtime_t;

```

Sec i **gtime_t** predstavljaju djelić sekunde; **sec** iznosi 6.7×10^{-8} m kada se konvertira u udaljenost.

Nadalje, za potrebnu konverziju iz UTC u GPST koristi se sljedeći izraz:

$$t_{UTC} = t_{GPS} - \Delta t_{LS} \quad (21)$$

$$t_{GPST} = t_{UTC} + \Delta t_{LS} \quad (22)$$

Gdje je:

t_{UTC} – vrijeme u UTC

t_{GPST} – vrijeme prema UTC

Δt_{LS} – „delta“ vrijeme između UTC i GPST radi „skoka“ u sekundama (engl. cumulative leap) koje se mjeri od 6. siječnja 1980. i čije su vrijednosti poznate

Na temelju točnih vrijednosti „delta“ vremena može se preciznije obaviti konverzija iz UTC-a u GPST.

$$t_{UTC} = t_{GPS} - \{\Delta t_{LS} + A_0 + A_1(t_E - t_{ot} + 604800(WN - WN_t))\} \quad (23)$$

Gdje su:

A_0, A_1, t_E, WN i WN_t – parametri UTC-a sadržani u GPS navigacijskoj poruci.

Iduće, unutar RTKLIB-a pozicije satelita predstavljene su kao X,Y i Z komponenta u ECEF (engl. *Earth Center Earth Fixed*) koordinatnom sustavu. Takva vrsta koordinatnog sustava nije strogo definirana već ovisi o efemeridama satelita. Tako su GPS signali i navigacijske poruke dobivene su u WGS-84 sustavu, no postoje i drugi sustavi kao što su PZ90.02 ili ITRF. Svi oni dati će više-manje iste rezultate o efemeridama, ali ukoliko se želi računati vrlo visoka preciznost poželjno je svesti sve na jedan koordinatni sustav. Stoga se provodi konverzija iz geodetske pozicije (engl. *Geodetic position*) u ECEF XYZ poziciju. Uz

⁸⁸ **Time_t** standardni je izraz koji se koristi unutar standardne *C library*

konverziju u ECEF XYZ konverziju RTKLIB također pruža mogućnost i konverzije iz pojedinačnih, lokalnih sustava.

RTKLIB u potpunosti podržava sve podatke o efemeridama i satovima sa GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou te SBAS satelita. Za modele u stvarnom vremenu, podatci o efemeridama i satu sa satelita ispravljeni su SBAS i RTCM 3 SSR dugoročnom i brzom ispravkom. Nadalje, precizni podatci o efemeridama za GPS sustav uobičajeno su dane u podatku SP3-c oblika koji ima zapis o položaju satelita svakih 15 min. Za dobiti položaj satelita u vremenu t potrebno je interpolirati. RTKLIB koristi fiksni stupanj polinomne interpolacije putem Newton-Nevillovog algoritma.

Također prilikom rada programskog paketa pri obradi potrebno je uzeti u obzir i relativistički efekt koji se mora ispraviti, a moguće ga je izraziti na sljedeći način⁸⁹:

$$dT^s(t) = \frac{(t_{i+1} - t)dT^s(t_i) + (t - t_i)dT^s(t_{i+1})}{t_{i+1} - t_i} - 2 \frac{r^s(t)^T v^s(t)}{c^2} \quad (24)$$

Gdje su:

r^s –satelitski položaj

v^s –brzina satelita

Na koncu potrebno je staviti naglasak i na definiranje ionosfere te ionosferskog modela unutar RTKLIB programa. Za ionosferu koristi se standardni *shell-ov* model (pojednostavljeni model ionosfere), a na temelju ionosferskih parametra koji se nalaze u navigacijskoj poruci dolazi se do konačnog izraza za Klobucharev model ispravke ionosferskog kašnjenja unutar programa, a on glasi:

$$I_r^s = \left\{ \begin{array}{ll} F \times 5 \times 10^{-9} & (|x| > 1.57) \\ F \times \left(5 \times 10^{-9} + \sum_{n=1}^4 \alpha_n \phi_m^n \times \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right) & (|x| \leq 1.57) \end{array} \right\} \quad (25)$$

Gdje su:

I_r^s –ionosfersko kašnjenje

⁸⁹ RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, p. 131-149, online: https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

F –faktor nagiba

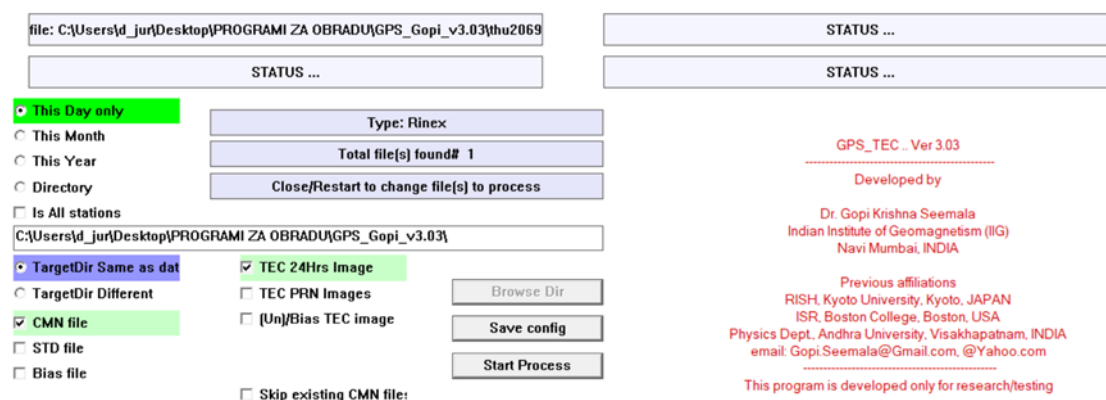
x –faktor

α_n –koeficijenti odaslani sa satelita korisniku

φ_m^n –geomagnetska širina korisnika

Uporaba modela ispravke predstavlja osnovnu uslugu koja je potrebna da bi se odvijalo istraživanje ovoga obujma.

Za jasno stanje ionosfere i ionosferskoga kašnjenja potrebno je dobiti i podatak o količini slobodnih elektrona (TEC). Za dobivanje tih informacija koristi se drugom vrstom računalnog programa naziva GPS_TEC (ili kolokvijalno Gopi po nazivu kreatora toga programa). Ulazni podatci za ovaj program su: navigacijske datoteke, konvertirane opservacijske datoteke te nove posebne datoteke koje se uzimaju kako bi se izolirala i uklonila komponenta sklopovskog kašnjenja (engl. *Differential Code Biases* – DCB datoteke)⁹⁰. Konverzija opservacijskih datoteka radi se putem programa u paketu RTKLIB-a, naziva crx2rnx.exe, kojega se poziva putem računalnog komandnog upita (engl. Command Prompt) koji je integriran u svako današnje računalo. Konverzijom opservacijske datoteke dobiva se nova opservacijska datoteka (npr. scor0830.150). Druge nove datoteke (dvije), DCB datoteke, dobivaju se pristupom baze podataka identičnim postupkom kao i kod dobivanja navigacijskih ili opservacijskih datoteka⁹¹.

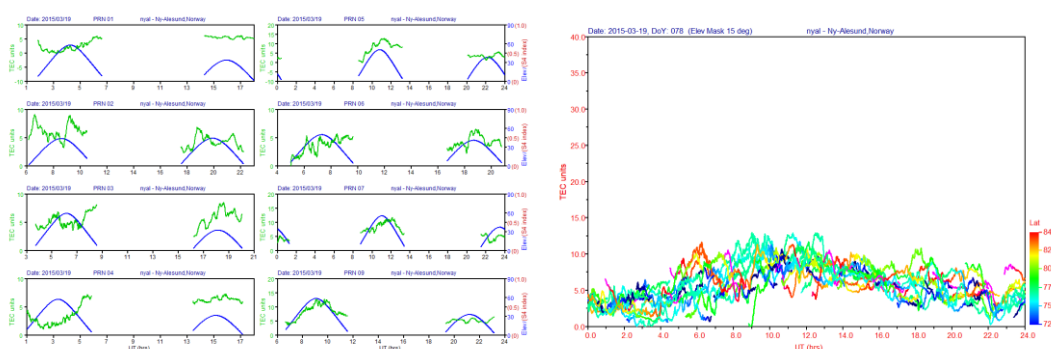


Slika 24. Radno sučelje programa GPS_TEC
Izvor: Izradio autor na temelju programa GPS_TEC

⁹⁰Differential Code Biases (DCB), Astronomical Institute, Bern, online: https://www.aiub.unibe.ch/research/code_analysis_center/differential_code_biases_dcb/index_eng.html

⁹¹ Pristup bazi podataka za dobivanje datoteka o sklopovskom kašnjenju: <ftp://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>

S dvije DCB datoteke (npr. P1P221503.DCB i P1C11503.DCB), konvertiranom opservacijskom datotekom te navigacijskom datotekom „ulazi se“ u program koji kao rezultat daje tri vrste datoteka koje služe za daljnju obradu te grafički prikaz TEC vrijednosti za odabrano područje dobivene sa svih dostupnih satelita. Datoteke koje ovaj program daje kao rezultat su: kalkilirane TEC vrijednosti u *ascii* obliku (nastavka .CMN), dnevni iznos TEC vrijednosti u *ascii* obliku (nastavka .STD) te podatke o vrijednostima dobivene iz satelita te prijarnika (engl. *Bias files*)⁹².



Slika 25. Grafički prikaz TEC vrijednosti dobivenih putem programa GPS_TEC na primjeru jedne referentne stanice (Ny-Alesund, NYAL, 19. ožujak 2015. godina)
Izvor: Izradio autor na temelju programa GPS_TEC

Krajnji korak, prije analize, jest obrada podataka dobivenih iz prethodna dva programa. Statistička obrada podataka odvijala se putem programa R studio koji koristi R programski jezik. Prvenstvena uloga ovoga programa jest statistička obrada velikih podataka i manipuliranje podacima kako bi kao rezultat dobili željene grafičke prikaze i ostale željene statističke rezultate.

4.2 Promatrano razdoblje

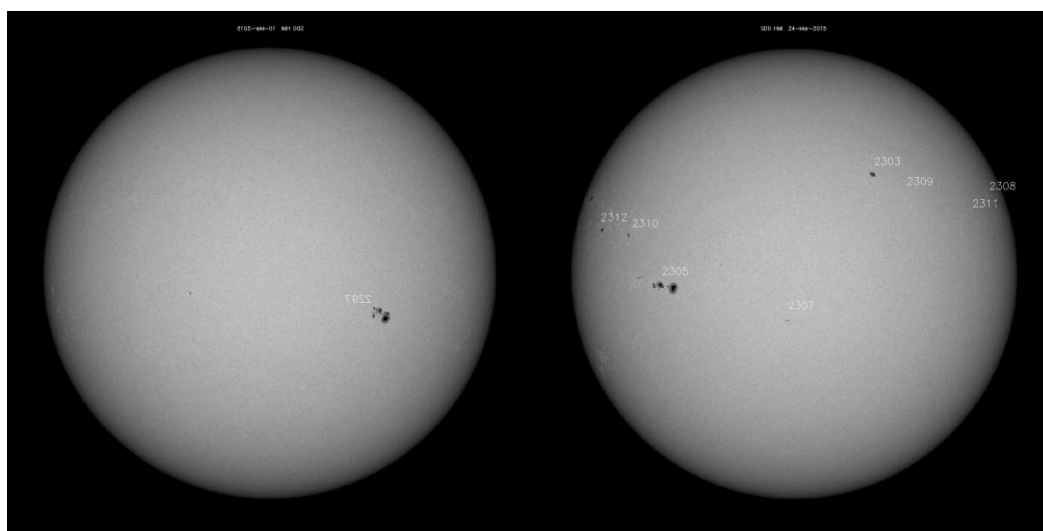
Prilikom obrade podataka za tri referentne stanice, potrebno je proučiti opće stanje Sunca, odnosno svemirsko vrijeme. Ovaj korak dolazi prije same obrade podataka kako bi se dobio opći dojam o mogućim većim ili pak možda manjim odstupanjima za neki period. Potrebno je sagledati širu sliku te sagledati postoji li kakva veća zabilježena Sunčeva aktivnosti. Svi podatci

⁹² Krishna Seemala G.: *GPS_TEC analysis application*, Indian Institute of Geomagnetism (IIG), Navi Mumbai, India, online: <https://seemala.blogspot.com/>

dobiveni su putem arhive svemirskog vremena koji se nalaze na službenim web stranicama SpaceWeatherLive.com⁹³.

Na temelju arhive podataka te prijašnjim znanstvenim radovima, dolazi se do interesantnog zaključka da je godina 2015. poznata nastupu jednih od većih geomagnetskih oluja unutar Sunčeva ciklusa 25⁹⁴. Prilikom analize svemirskog vremena u obzir će se uzeti sljedeće: broj sunčevih pjega, K_p i brzina sunčeva vjetra. Tim će se podacima dobiti opći dojam o stanju svemirskog vremena.

Prvi podatak je o općem stanju Sunčevih pjega. Na datum 10. ožujak Sunčevih pjega je bilo 43⁹⁵, dok je na datum 24. ožujak broj pjega narastao na 127.



Slika 26. Sunčeve pjege na dan 10. ožujak (lijevo) i 24. ožujak (desno)
Izvor: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/10/dayobs.html>

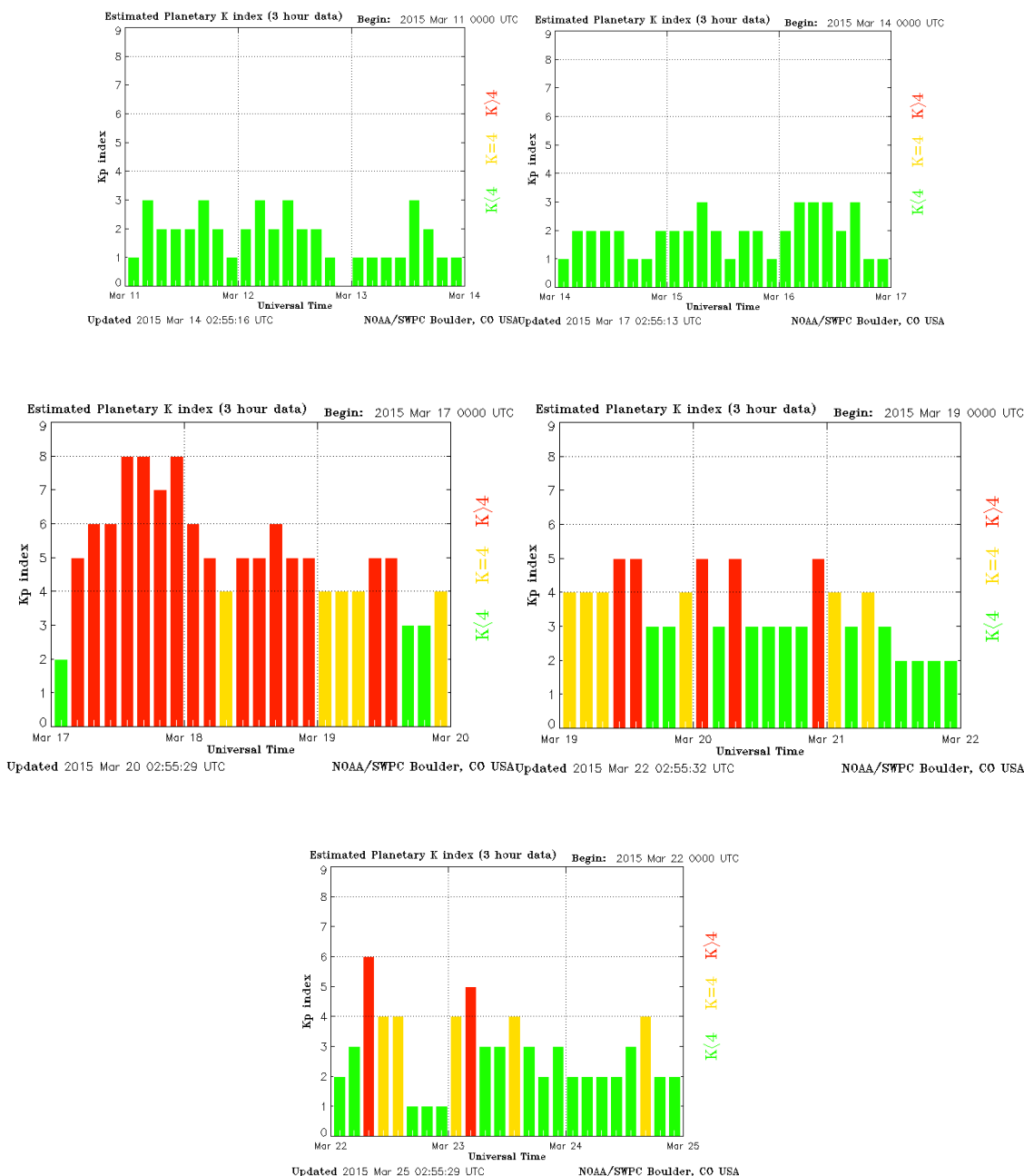
Podatak o stanju na Sunčevoj površini ukazuje nam da je vrlo moguć porast Sunčevih aktivnosti i njegov utjecaj na općenito Zemljinu ionosferu.

Idući podatak je podatak o veličini K_p . U periodu od 10. ožujka pa do kraja promatranja jasno je uočljivo da je najveću vrijednost K_p dosegao sa 17. na 18. ožujak kada je ta vrijednost iznosila 8. Tijekom perioda od 10. do 17. ožujka ta vrijednost nije se penjala iznad 4 kada je nastupio veliki „skok“ i trajao od 17. do 19. ožujka. To nas upućuje da se u tom periodu javlja geomagnetska oluja jačine G3 i G4.

⁹³ SpaceWeatherLive.com., arhiva podataka ,online: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/10/dayobs.html>

⁹⁴ Pongračić B., Kos S., Brčić D. (2017.): *Spatial Assessment of GPS Ionospheric Delay Model During St. Patrick's Geomagnetic Storm*, 11th Annual Baska GNSS Conference, Baska, Krk, Croatia, University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka, The Royal Institute of Navigation, London, UK, online: <https://www.pfri.uniri.hr/web/hr/dokumenti/zbornici-gnss/2018-GNSS-11.pdf>

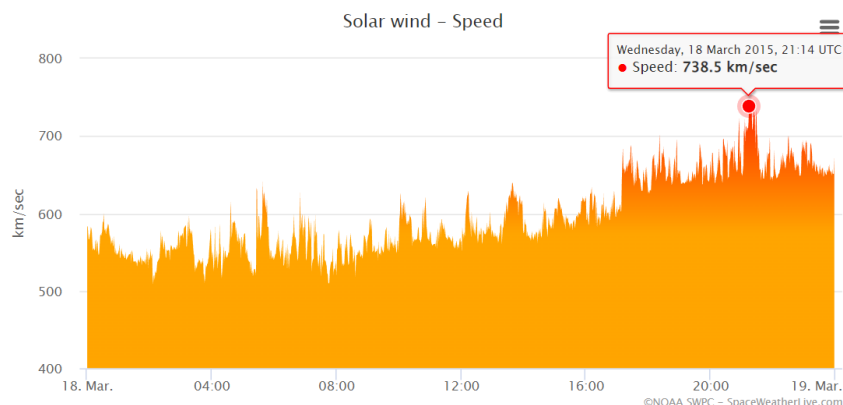
⁹⁵ Jedna pjega predstavlja zapravo skup od 10 pjega; zapravo se odnosi na količinu skupova



Slika 27. Indikatori geomagnetske aktivnosti od 10. do 24. ožujka 2015.

Izvor: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/10/dayobs.html>

Na dan 18. ožujak, kako navodi *SpaceWeatherLive*, dolazi do geomagnetske oluje jačine G4 koja nastaje radi izbacivanje koronarne mase (engl. *coronal mass ejection*) i C9 jačine solarnih baklji (engl. *solar flare*) – što je jedna od jačih naspram prijašnjih godina. Pri Zemljinim polovima radi iznimne Sunčeve aktivnosti mogla se zapaziti iznimno jaka Aurora Borealis što je indikacija da je došlo do iznimno velike ionizacije i nastanka sporadičnih slojeva.



Slika 28 Brzina Sunčevog vjetra na dan 18. ožujak 2015

Izvor: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/10/dayobs.html>

Najveća brzina Sunčeva vjetra zabilježena je u večernjim satima gdje je dosegla vrijednost od 738,5 km/s.

Indikatori K_p , Sunčev vjetar, Sunčeve pjege *itd.* upućuju na to da su u periodu od 10. do 24. ožujka moguća veća odstupanja u položajima korisnika te da je ionosferski učinak bio iznimno jak na proračun položaja korisnika.

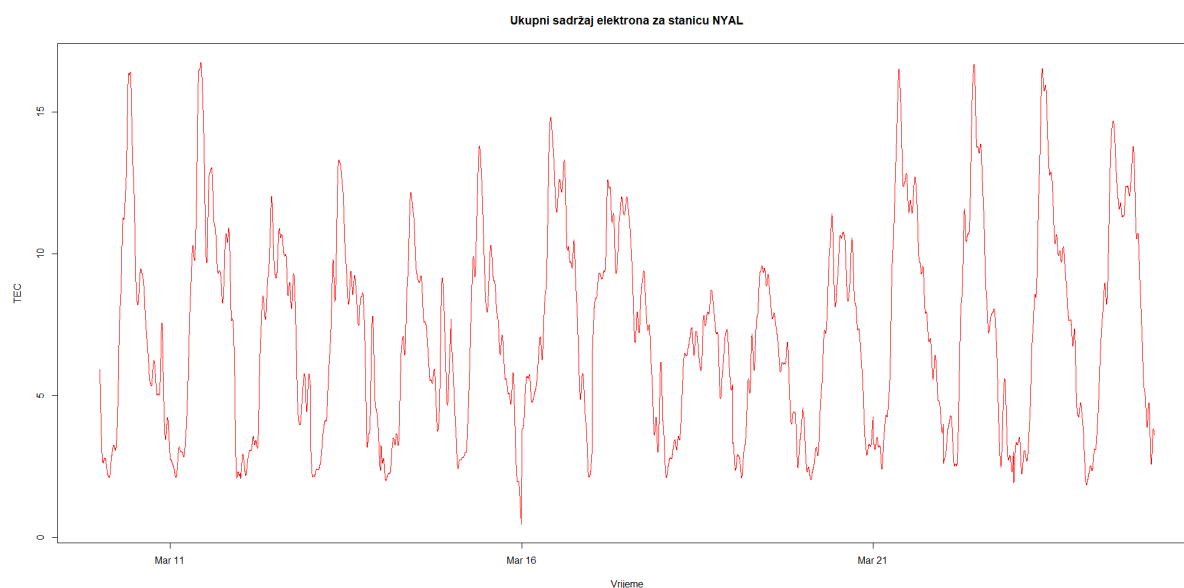
4. 3 Rezultati istraživanja

Rezultati istraživanja odnose se na statističku analizu odstupanja položaja na tri referentne stanice, obje smještene pri Zemljinom sjevernom polu. Prvo biti će prikazana količina TEC jedinica za svaku stanicu posebno kroz cijeli period od 15 dana, zatim odstupanja geografske širine, dužine te nadmorske visine (također za svaku stanicu posebno kroz cijeli period promatranja), histogrami odstupanja, reziduali, statističke tablice sa određenim parametrima za svaku stanicu posebno te srednja kvadratna pogreška položaja.

4.3.1. TEC vrijednosti

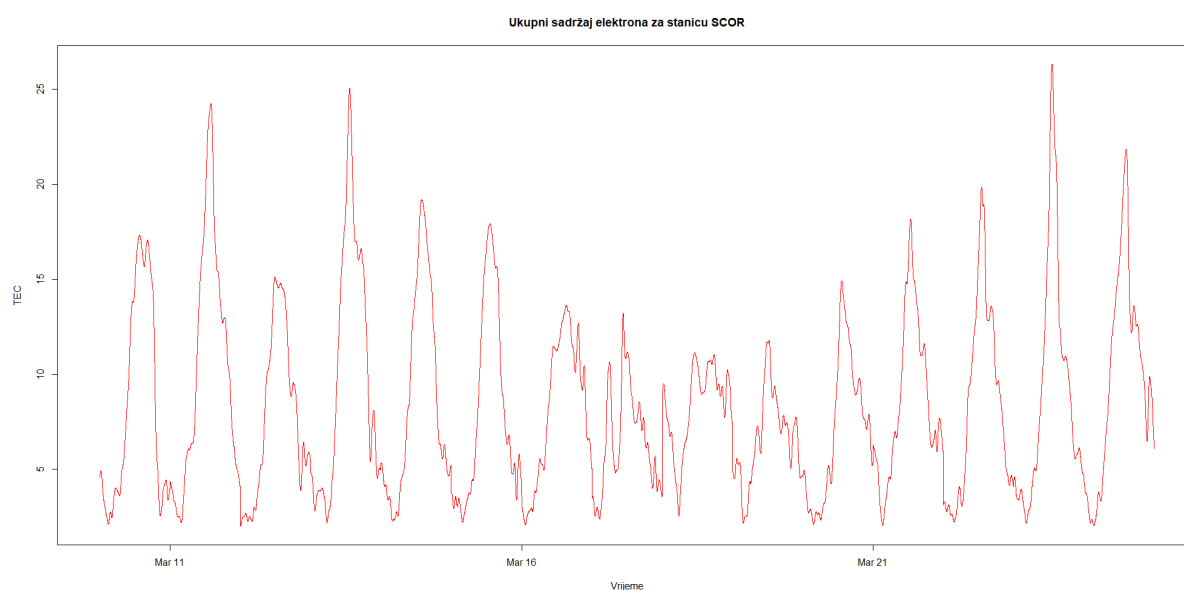
Vrijednosti **slobodnih elektrona** za stanicu NYAL, podatci pokazuju da je najveća TEC vrijednost u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine te je iznosila 15 (TEC) jedinica. Vrijednosti od 15 TEC jedinica bile su 10. i 11. ožujka te 21., 22. i 23. ožujka. Te su vrijednosti

imale najveću vrijednost za vrijeme dana, dok dolaskom noći TEC jedinice opadaju te se spuštaju na minimum. Najmanje TEC vrijednosti bile su 18. ožujka kada vrijednosti nisu prelazile 10 TEC jedinica.



Slika 29. TEC jedinice za stanicu NYAL u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

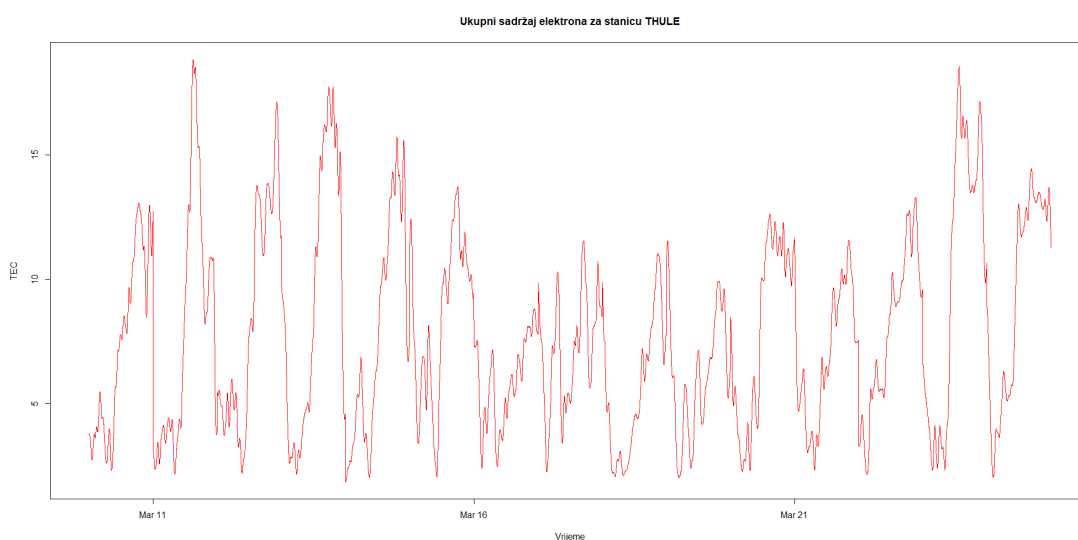
Za sljedeću stanicu, SCOR, iznos TEC jedinica bio je mnogo veći nego kod stanice NYAL. Naime, dosežu vrijednosti u iznosu od 25 TEC jedinica, što je za 10 jedinica više nego kod stanice NYAL. Veliki iznosi od 25 TEC jedinica bili su na dan 11. ožujak, 13. i 23. ožujak. Najmanje vrijednosti iznosile su oko 10-ak TEC jedinica u periodu od 17. do 19. ožujka.



Slika 30. TEC jedinice za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za posljednju stanicu THU, vrijednosti su bile manje nego kod stanice SCOR, ali veće od stanice NYAL. Vrijednosti su prelazile 15 TEC jedinica, no nisu prelazile iznose od 20 TEC jedinica. Najveće vrijednosti bile su na dan 11. ožujak te 23. ožujak, dok su najmanje ponovno bile u periodu od 17. do 19. ožujka.



Slika 31. TEC jedinice za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Najveće vrijednosti TEC jedinica imala je stanica SCOR nakon koje slijedi stanica THU te stanica NYAL kojoj se vrijednosti nisu penjale iznad 15 TEC jedinica.

Preostali statistički podatci o TEC vrijednostima nalaze se u prilogu ovoga rada.

4.3.2 Odstupanja položaja

Nakon obrade vrijednosti slobodnih elektrona, na red dolaze **odstupanja položaja** u istom vremenskom periodu. Na grafičkim prikazima biti će iskazana odstupanja u metrima za geografsku širinu, geografsku dužinu te nadmorsku visinu, a statističkim tablicama koje se nalaze u *prilogu* biti će prikazane konkretne brojke o statističkim parametrima odstupanja. Na histogramima će biti prikazana učestalost odstupanja za sve tri koordinate. Konačno, biti će prikazani i reziduali odstupanja, razlika između modeliranih i nemodeliranih odstupanja te srednja kvadratna pogreška položaja (engl. *Root Mean Square* – **RMS**). RMS vrlo jasno

pokazuje odstupanja položaja kod nemodeliranih i modeliranih vrijednosti zbog kvadrata u formuli kojima se jače penaliziraju veća odstupanja⁹⁶.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} \quad (26)$$

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \quad (27)$$

$$X_{RMS} = \sqrt{\langle x^2 \rangle} \quad (28)$$

gdje $\langle x^2 \rangle$ predstavlja srednje vrijednosti x_i^2

Gdje su:

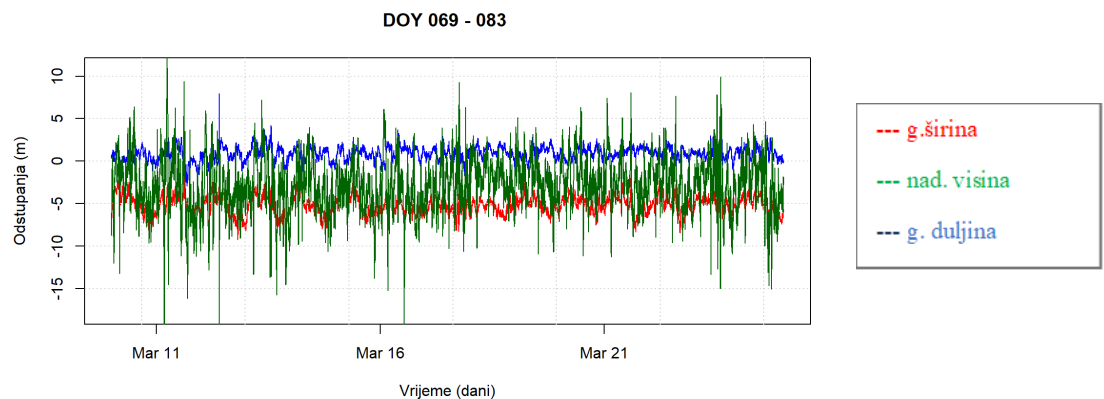
X_{RMS} –srednja kvadratna pogreška

n – broj opažanja

x_i^2 – srednja vrijednost razlike referentnih i opaženih vrijednosti

4.3.2.1. Stanica Thule (THU)

Kod stanice THULE za nemodelirane vrijednosti, rezultati odstupanja su bili sljedeći: najveća odstupanja položaja uviđaju se kod nadmorske visine gdje odstupanja dosežu vrijednosti od -15 do 10. Najmanja odstupanja očitavaju se u pogledu geografske duljine.

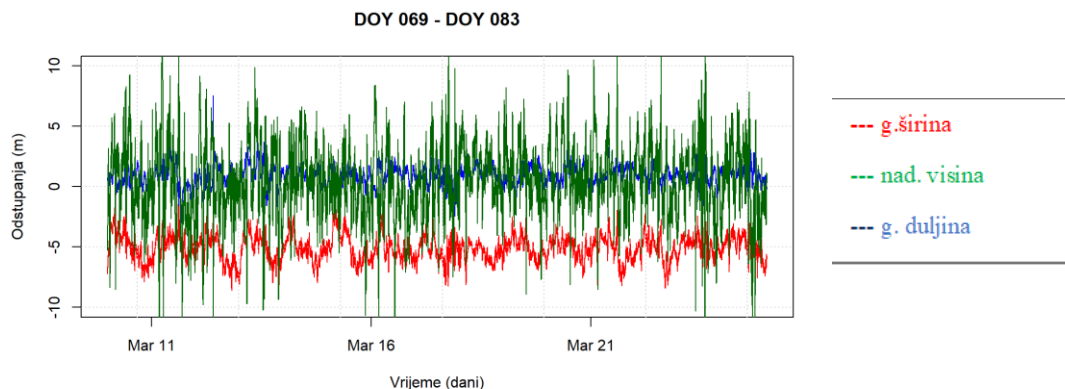


Slika 32. Nemodelirani zapisi u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 (THULE)

⁹⁶ Root-Mean-Square, Wolfram Math World, online: <https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

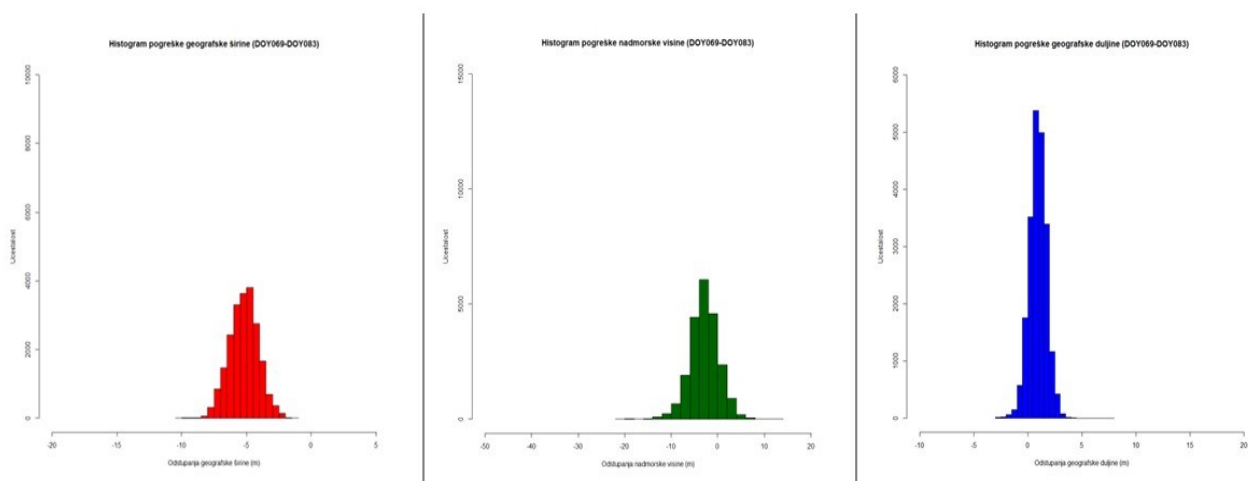
Ukoliko se uključi ionosferski model ispravke, odstupanja se nisu u potpunosti uklonila. Nadmorska visina također ima najveća odstupanja.



Slika 33 Modelirani zapisi u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 (THULE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

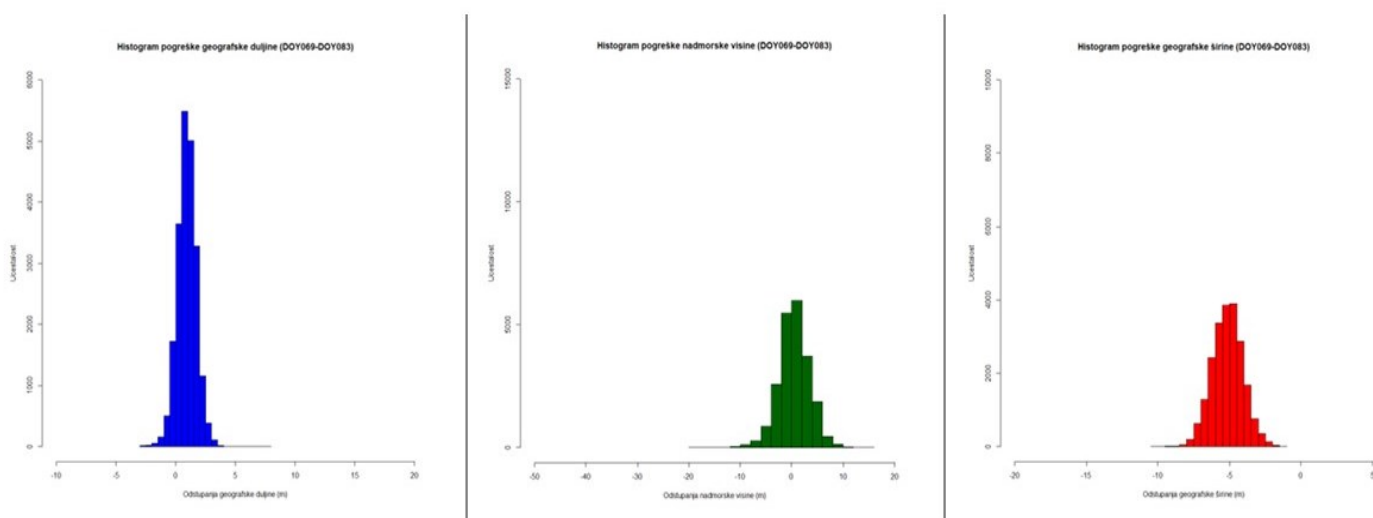
Kod nemodeliranih vrijednosti, najviše odstupanja ima geografska duljina gdje se odstupanja svega par metara (oko 3 metara) broje čak preko 5000 puta. Kod geografske širine javljaju se najveće pogreške koje su uglavnom oko 5 metara. Tih odstupanja ima 4000 tijekom cijelog perioda od 15 dana.



Slika 34. Histogrami pogrešaka za odstupanja bez ionosferske ispravke za period od 10. do 24. ožujka 2015. godine (THULE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Kod modeliranih vrijednosti odstupanja ponajviše ima kod duljine kod kojih je učestalost velika, posebice onih od svega par metara. No, kod visine i duljine dolazilo je do toga da nije bilo odstupanja. Kod visine takva učestalost je bila oko 5000 puta, a kod duljine skoro 6000 puta.

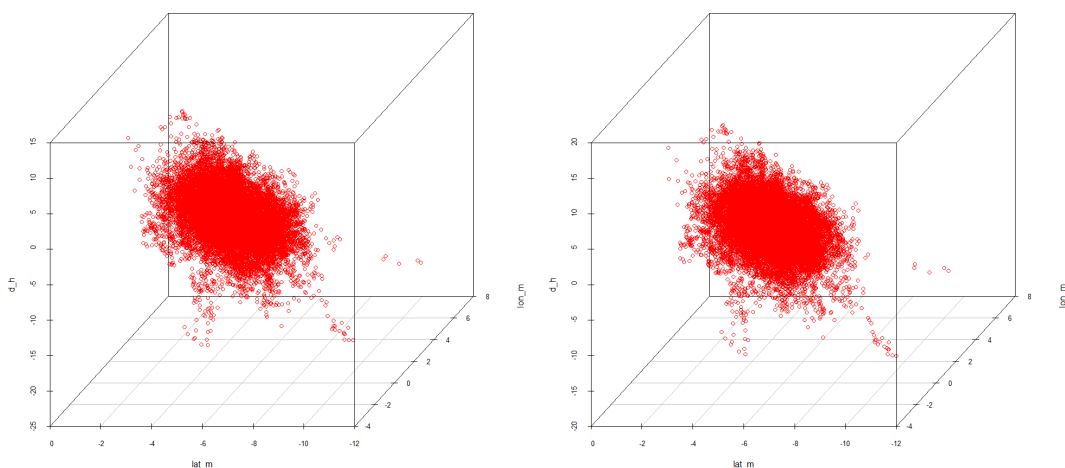


Slika 35. Odstupanja modeliranih vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine (THULE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Kod modeliranih vrijednosti uočena su isto odstupanja, ponajviše kod duljine kod kojih je učestalost velika, posebice onih od svega par metara. No, kod visine i duljine dolazilo je do toga da nije bilo odstupanja. Kod visine takva učestalost je bila oko 5000 puta, a kod duljine skoro 6000 puta.

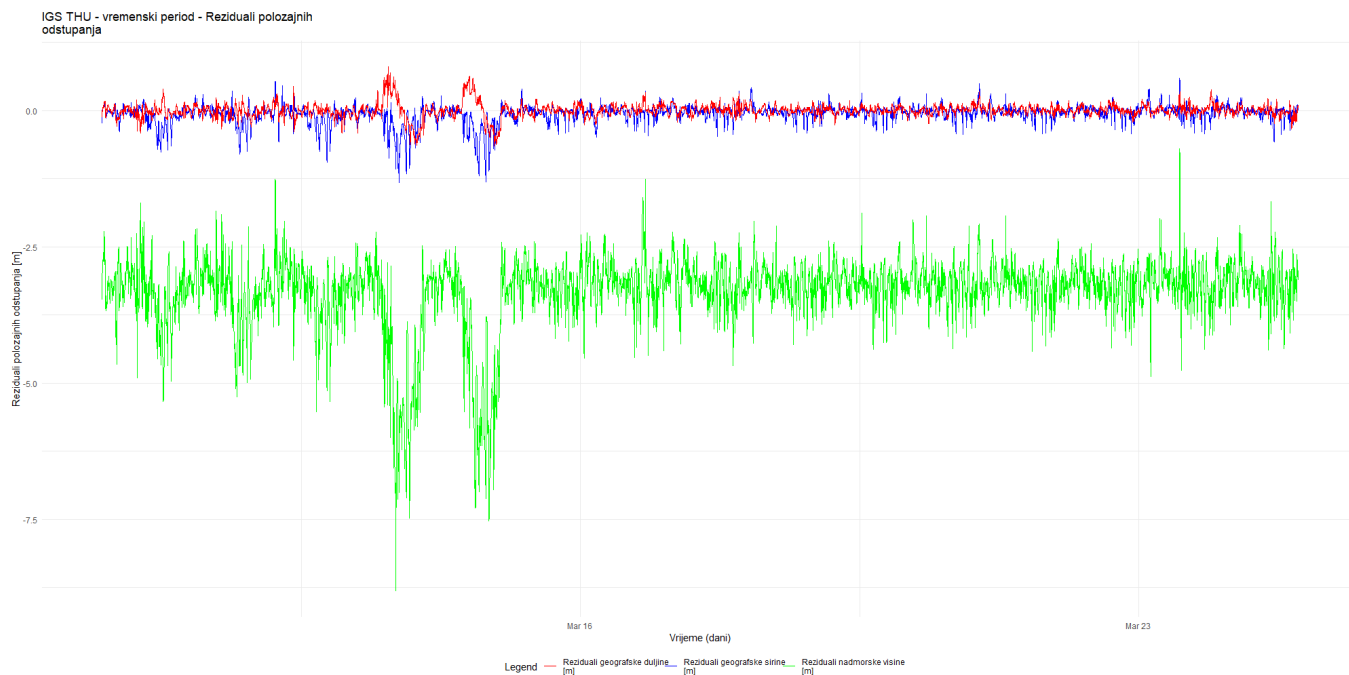
Odstupanja položaja moguće je prikazati i 3D vizualizacijom te se ona nalazi na sljedećoj slici rednoga broja 36.



Slika 36. 3D vizualizacije nemodeliranih (lijevo) i modeliranih (desno) odstupanja za period od 15 dana (THULE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Nakon 3D vizualizacije, potrebno je iskazati rezidualne vrijednosti – statistički te grafičkim prikazom. Na x-osi grafa nalazi se vremenski period od 15 dana, dok je na y-osi vrijednost odstupanja. Manja razlika između dvije vrijednosti u pogledu tumačenja reziduala označava i manju učinkovitost ispravljačkog modela, u ovom slučaju ionosferskog.



Slika 37. Reziduali za stanicu THU u periodu od 10. do 24. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Statističkom analizom reziduala kroz period od 15 dana evidentno je da najveću razliku ima nadmorska visina – oko 3 metra (gledajući srednju vrijednost, *mean.*). Geografska duljina gotovo i da nema razlike, dok srednja vrijednost razlike modeliranih i nemodeliranih zapisa iznosi oko 6 cm.

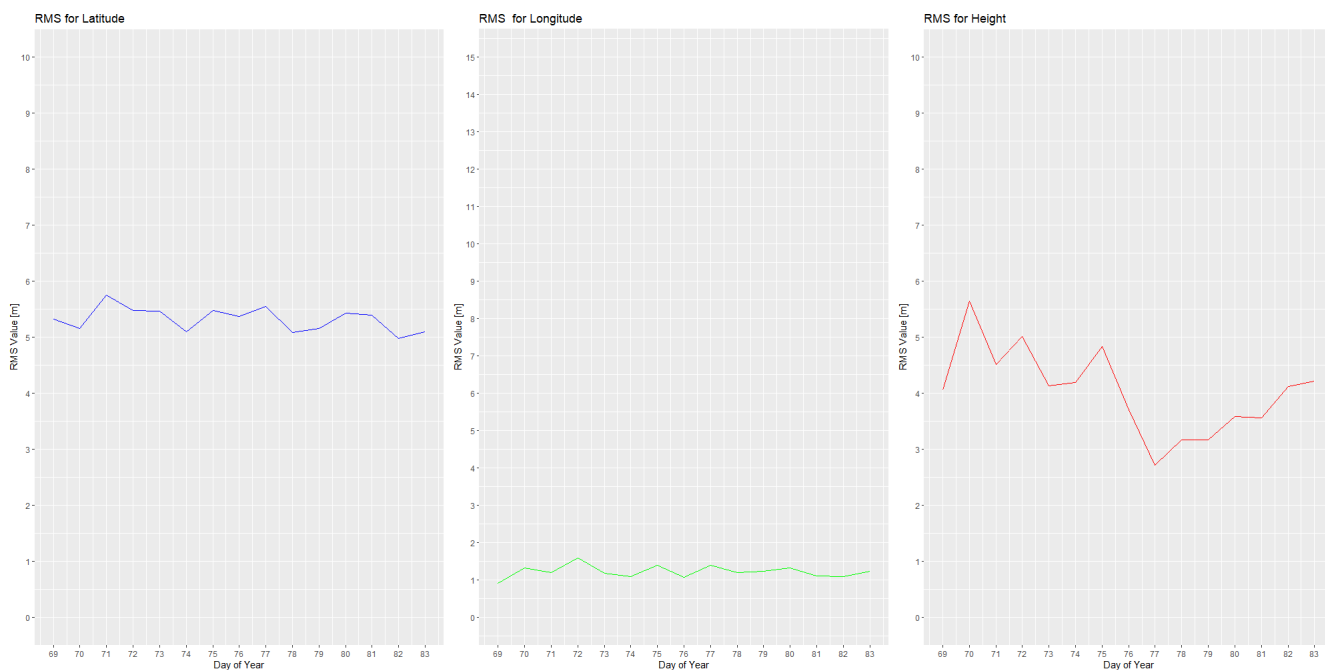
THU	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
Min,	-8,8143	-0,646275156	-1,318994399
1st Qu,	-3,461575	-0,051172181	-0,09434088
Median	-3,2037	0,000646767	-0,025779841
Mean	-3,328926134	0,002855596	-0,061116428
3rd Qu,	-2,984925	0,059909999	0,0200016
Max,	-0,6927	0,803025533	0,5894916

Tablica 8. Reziduali položajnih zapisa za stanicu THU tijekom perioda od 10. do 24. ožujka 2015

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

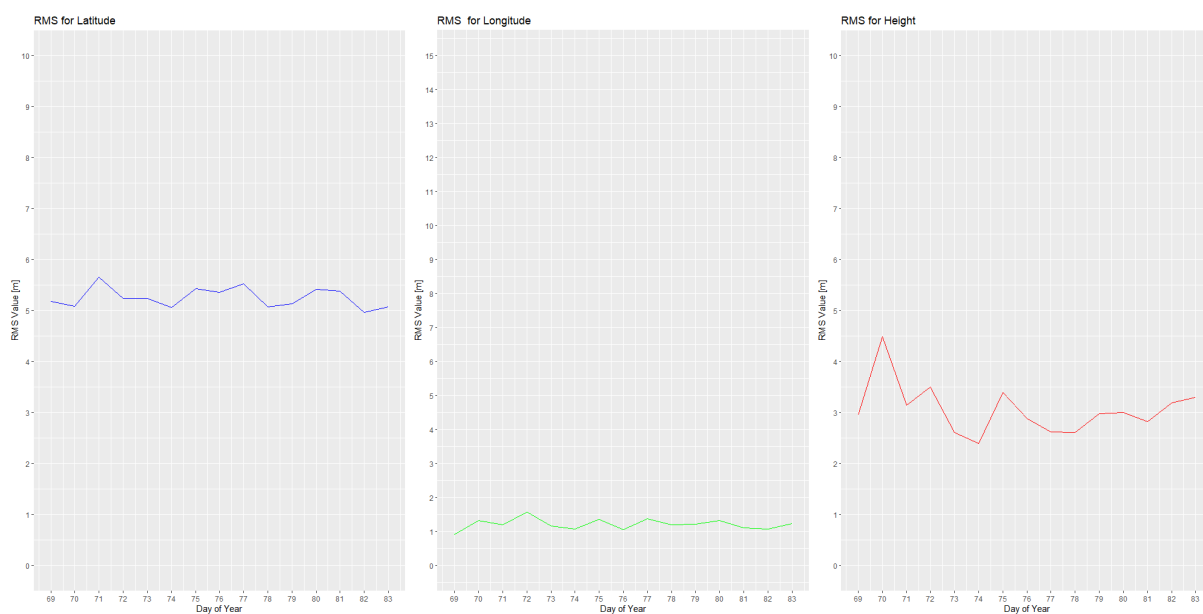
Na kraju, potrebno je prikazati i srednju kvadratnu pogrešku položaja (engl. *Root Mean Square* – **RMS**). RMS računa se posebno za položaje dobivene s i bez uporabe modela ispravke.

Prvi slučaj je kada je model ispravke bio isključen. Na tri grafa prikazan su vrijednosti RMS gdje prvi graf prikazuje vrijednosti za geografsku širinu, nakon čega slijede vrijednosti za geografsku dužinu te nadmorsku visinu. Odmah je uočljivo da tijekom perioda od 15 dana, najveću vrijednost imaju geografska širina te nadmorska visina.



Slika 38. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU bez modela ispravke (OFF)
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Na sljedeća tri grafa (slika 39.) prikazane su RMS vrijednosti kada je model ispravke bio uključen. Prva vidljiva promjena među vrijednostima jest u pogledu nadmorske visine. Primjerice samo na prvi dan promatranja uočava jasna razlika u vrijednostima nadmorske visine.



Slika 39. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU s modelom ispravke (ON)
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Na sljedećoj tablici prikazane su točne vrijednosti srednje kvadratne pogreške sa i bez uključenog modela ispravke. Najveće vrijednosti pojavljuju se u pogledu geografske širine nakon koje slijedi nadmorska visina. Srednja kvadratna pogreška za geografsku duljinu, naspram ostale dvije referentne vrijednosti, ne doseže vrijednost veću od otprilike 1.6 m; najveće vrijednosti su bile na dan 13. ožujak.

Thule Airbase, Grenland							
THU isključen model ispravke				THU uključen model ispravke			
DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina	DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina
69	5,321864683	0,904930344	4,065207434	69	5,186918957	0,907756982	2,954053791
70	5,158714466	1,32598375	5,648596037	70	5,084971662	1,325048002	4,486010742
71	5,754405569	1,200492776	4,513728214	71	5,65471869	1,196910619	3,146996455
72	5,477936751	1,597477731	5,010626773	72	5,245505075	1,579270144	3,499637971
73	5,471268234	1,176818086	4,12711545	73	5,23666122	1,154379082	2,603830896
74	5,097431309	1,095467021	4,195358753	74	5,057669007	1,079469957	2,392696735
75	5,473566981	1,385631657	4,838851568	75	5,432106133	1,36359159	3,388514766
76	5,376234073	1,068993793	3,708041335	76	5,356661934	1,060845381	2,882108001
77	5,545063918	1,389651687	2,716517898	77	5,523143167	1,382624004	2,615501949
78	5,091219862	1,20006716	3,16738145	78	5,068467194	1,198974766	2,611131228
79	5,153634471	1,235002303	3,164983336	79	5,136059027	1,220226805	2,97935922
80	5,435180121	1,329754645	3,590173279	80	5,413381102	1,321091228	3,004399322
81	5,400161423	1,101978575	3,561903113	81	5,377914173	1,103647154	2,823012135
82	4,97392033	1,095731793	4,121039619	82	4,967865171	1,069128851	3,191546246
83	5,097244255	1,227370227	4,210657292	83	5,070471763	1,229980239	3,29722835

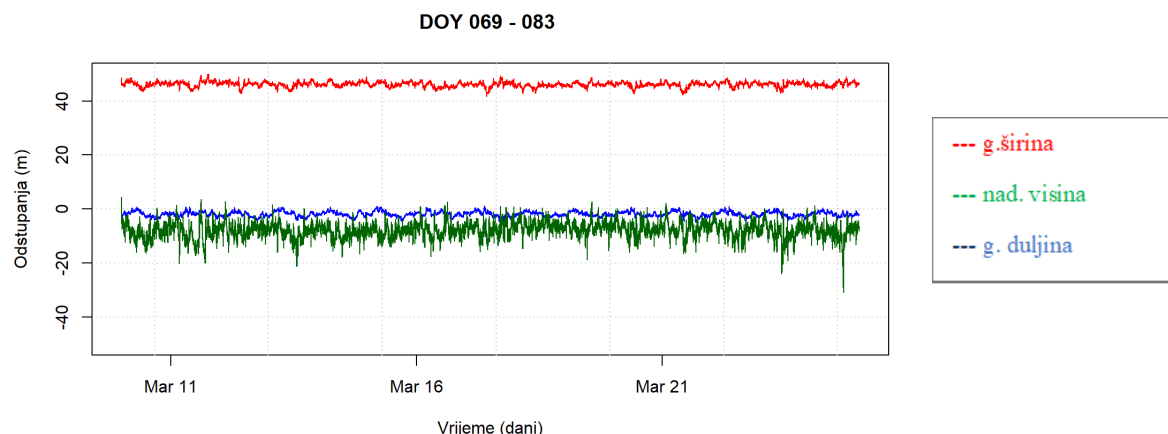
Tablica 9. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Ostale statističke vrijednosti odstupanja položaja nalaze se u prilogu rada.

4.3.2.2 Stanica Ny-Alesund (NYAL)

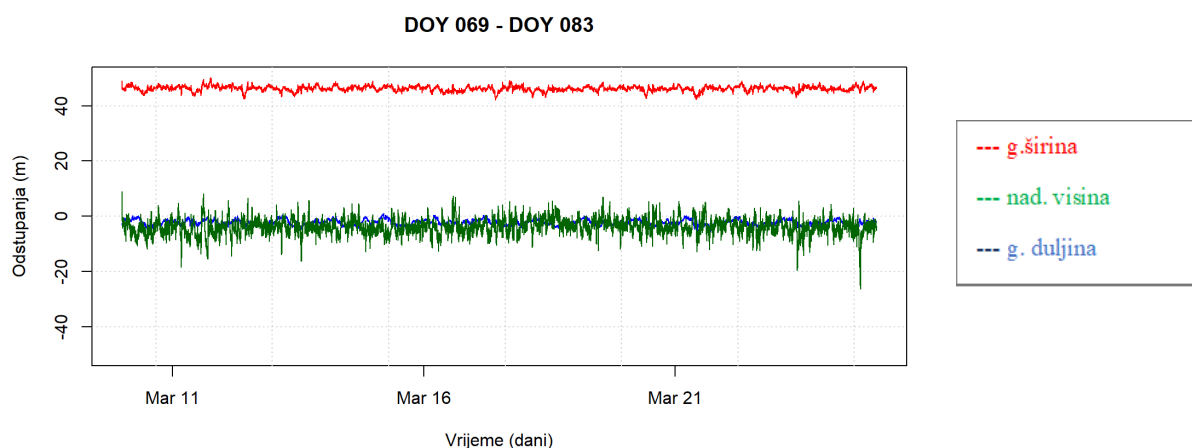
Stanica NYAL, smještena najsjevernije od sve tri referentne stanice kod nemodeliranih vrijednosti bilježila je najveće odstupanje u pogledu nadmorske visine. Geografsku širina, koja je po svojim odstupanjima imala vrijednosti oko 40 metara, imala je kroz cijeli period iste vrijednosti. Geografska duljina također je imala iste vrijednosti sa vrlo malo fluktuacija, no ništa naspram nadmorske visine čija su odstupanja bila dosežala vrijednosti u iznosu od svega par metara do 30ak metara.



Slika 40 Nemodelirane vrijednosti odstupanja položaja za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

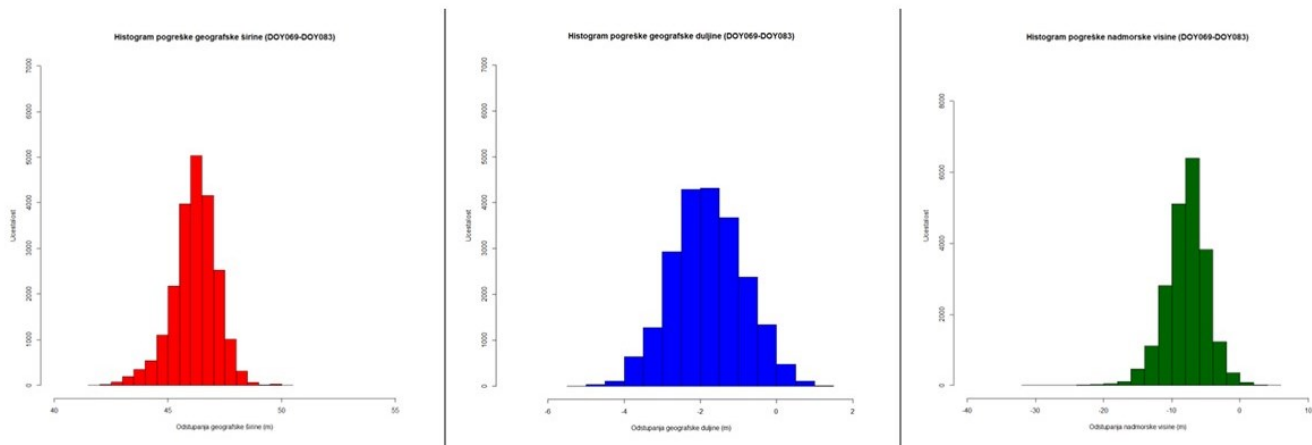
Pri uključenju ionosferskog modela također je najviše odstupanja bilo u pogledu nadmorske visine. Geografska širina ponovno je zadržavala stabilna odstupanja od otprilike 40 metara, a vrijednosti odstupanja geografske duljine bile su oko par metara.



Slika 41. Modelirane vrijednosti odstupanja položaja za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

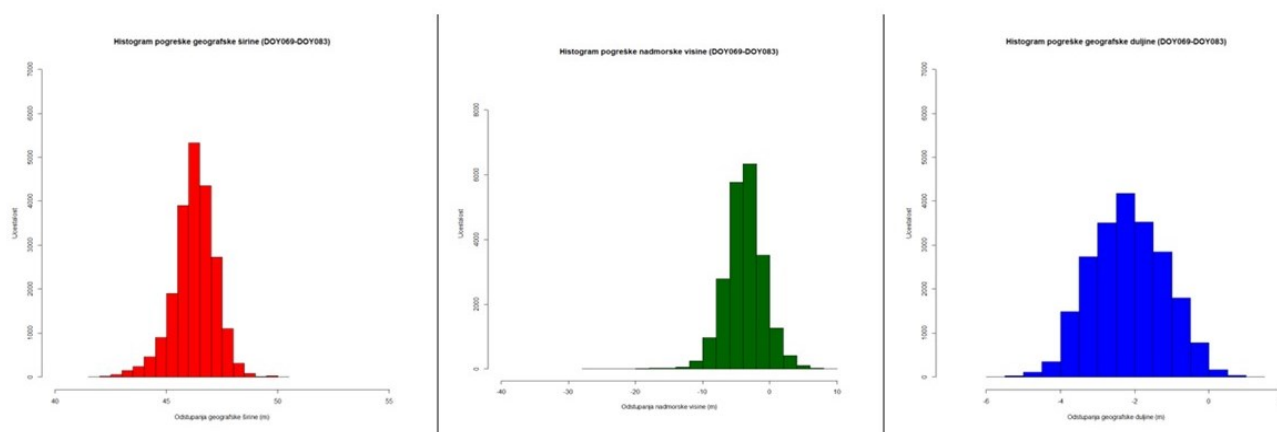
Vrijednosti odstupanja i njihovu učestalost tumače i histogrami učestalosti odstupanja. Kod nemodeliranih vrijednosti najveću učestalost odstupanja imala je nadmorska visina, oko 7-8 metara preko 6000 puta.



Slika 42. Histogrami učestalosti nemodeliranih odstupanja u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

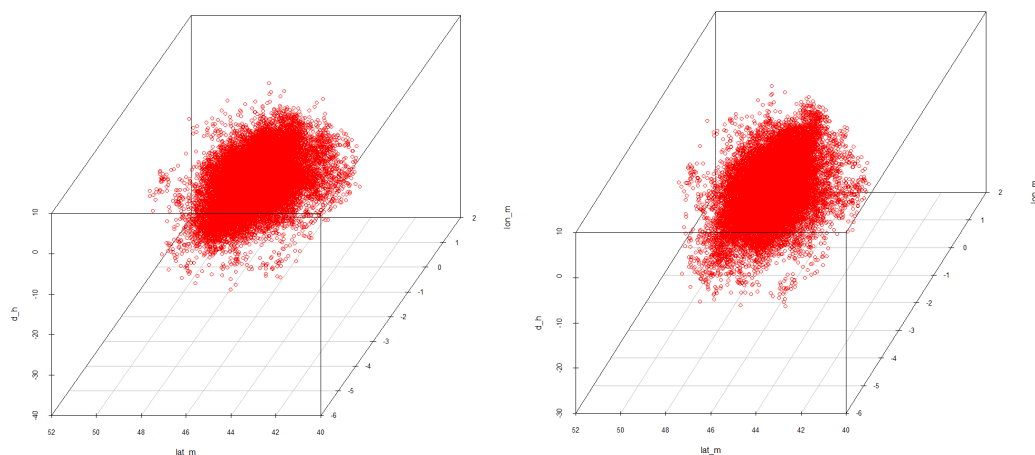
Naspram nemodeliranih vrijednosti, za modelirane vrijednosti histogrami učestalosti su sljedeći: također velike učestalost odstupanja nadmorske visine, oko 3 metara preko 6000 puta. Kod geografske duljine bilo je najmanje odstupanja gdje niti jedna vrijednost odstupanja ne prelazi 4000 puta.



Slika 43. Histogrami učestalosti modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

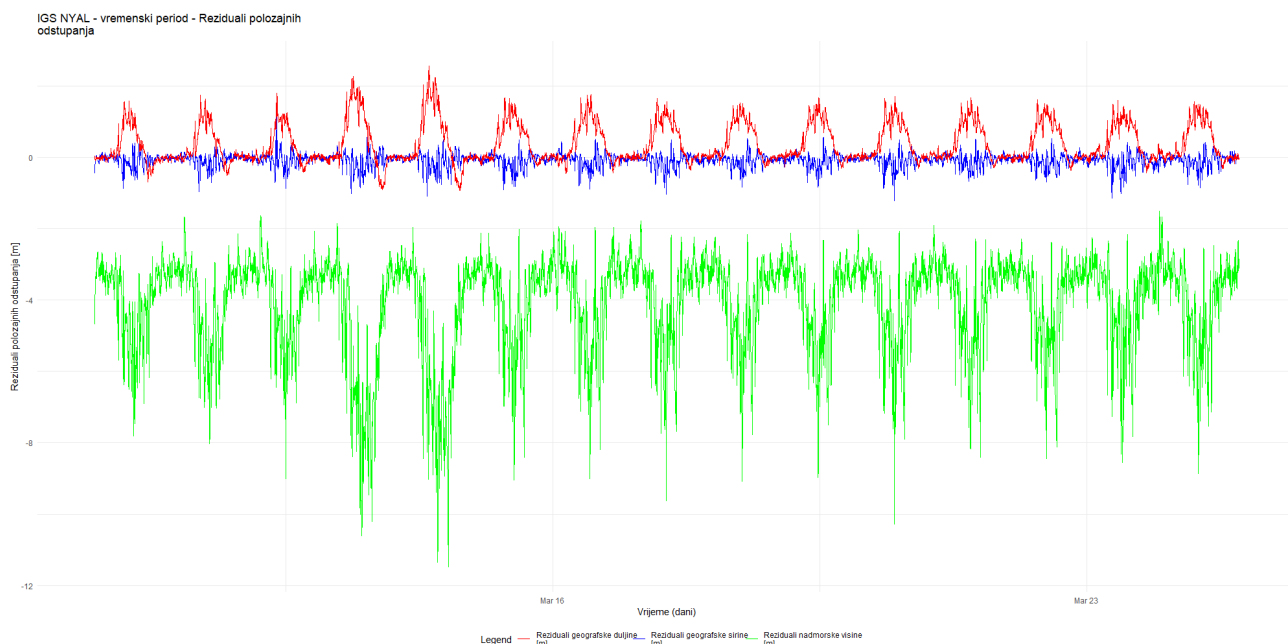
Prikaz odstupanja putem 3D vizualizacije nalazi se na sljedećoj slici (*slika 42*) te prikazuje razliku između odstupanja prilikom uključenog modela ispravke te isključenog modela ispravke.



Slika 44. 3D vizualizacija odstupanja za nemodelirane (lijevo) i modelirane (desno) vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Sljedeće što je potrebno prikazati su reziduali za stanicu NYAL u periodu promatranja. Kao i kod stanice THU, vrijednosti za nadmorsku visinu dosežu veće vrijednosti nego geografska širina ili dužina, odnosno razlika između maksimuma i minimuma nije toliko velika kao kod nadmorske visine.



Slika 45. Reziduali za stanicu NYAL u periodu od 10. do 24. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Ukoliko je reziduale prikazati konkretnim brojkama, razlika nadmorske visine između uključenog i isključenog modela iznosi 4 metra. Za geografsku duljinu ta je razlika u iznosu od 37 cm, a za geografsku širinu ona iznosi 7 cm.

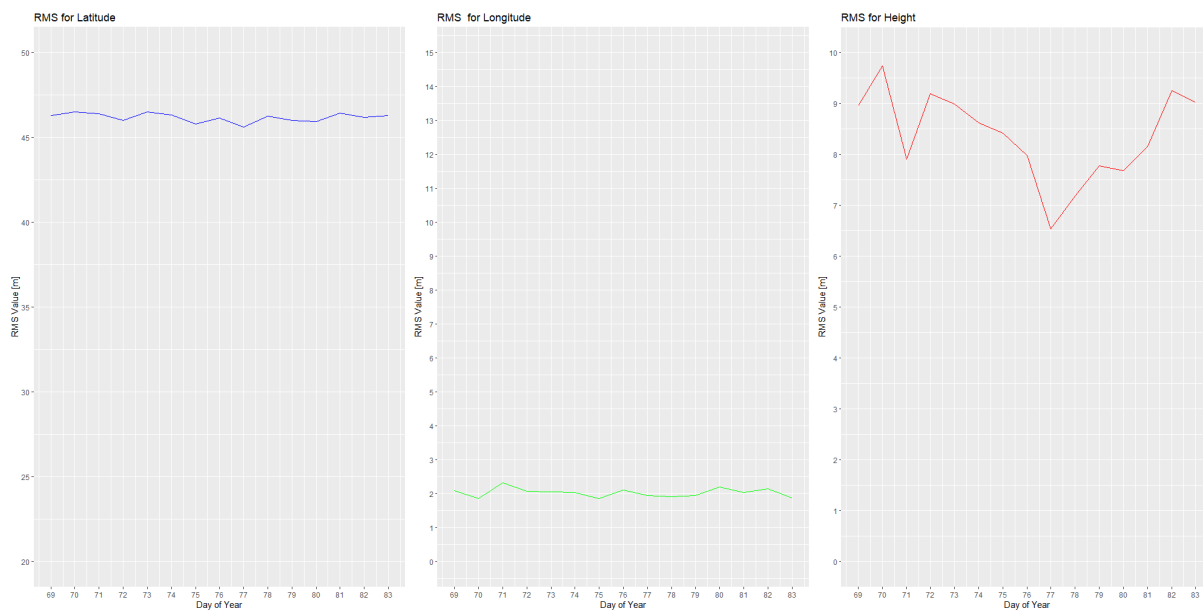
NYAL	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
Min,	-11,4869	-0,928881664	-1,213430401
1st Qu,	-4,73135	-0,011201371	-0,13934448
Median	-3,556	0,105548916	-0,04644816
Mean	-4,08390176	0,370119382	-0,078863172
3rd Qu,	-3,17865	0,806306665	0,02133504
Max,	-1,5061	2,558265045	1,3023264

Tablica 10. Reziduali položajnih zapisa za stanicu NYAL tijekom perioda od 10. do 24. ožujka 2015. godinu

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Na kraju, za analizu odstupanja položaja potrebno je prikazati i srednju kvadratnu pogrešku kroz period od 15 dana na stanici NYAL. Kao i kod prijašnje stanice, promatrat će se srednja kvadratna pogreška kada je uključen model ispravke te kada je isključen.

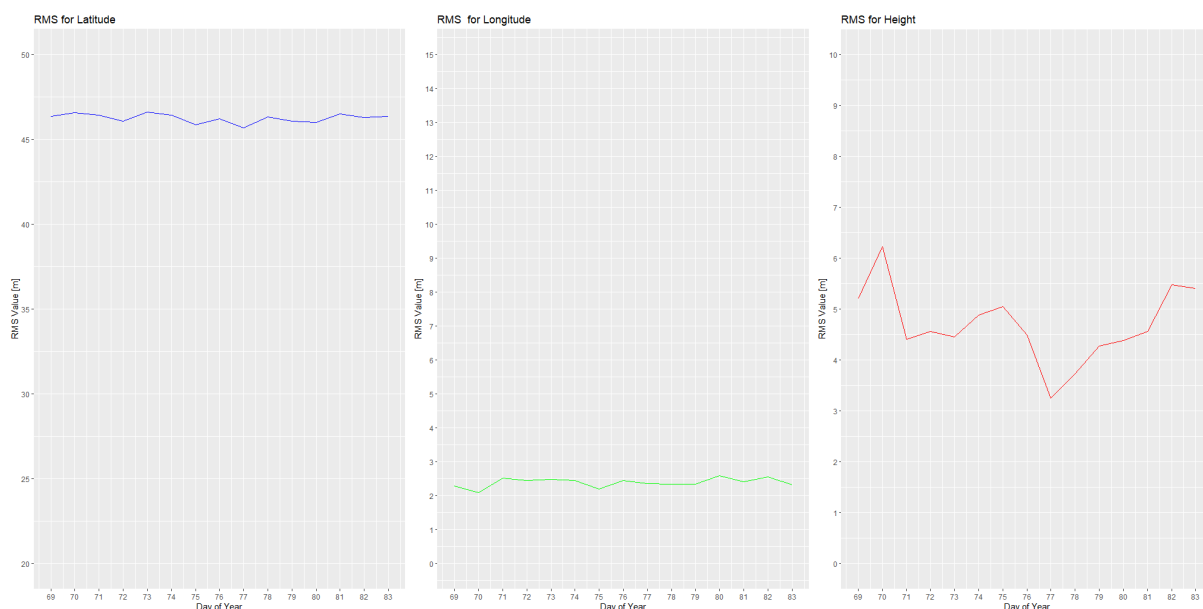
Prilikom isključenog modela ispravke uočava se da najveće vrijednosti ima geografska širina, dok je nadmorska visina imala najveće razlike; za geografsku širinu se vrijednosti nisu previše mijenjale te su se iznosi „vrtjeli“ oko 46 m, dok su za nadmorsku visinu vrijednosti bile u iznosima od 6 do 10 metara.



Slika 46. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL bez modela ispravke (OFF)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Prilikom uključenog modela ispravke vrijednosti su bile slične kao i bez uporabe modela ispravke. Srednje kvadratne pogreške tijekom perioda od 15 dana najviše su varirale kod nadmorske visine.



Slika 47. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL s modelom ispravke (ON)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Konkretna brojka o srednjoj kvadratnoj pogrešci nalaze se u sljedećoj tablici. U tablici nalaze se vrijednosti kada je model bio isključen te kada je model ispravke bio uključen. Za

razliku od stanice THU, vrijednosti su mnogo veće, posebice za geografsku širinu čije su vrijednosti puno veće. Jasne razlike među vrijednosti sa i bez uključenog modela vide se kod nadmorske visine gdje je primjerice za DOY 069 kod isključenog modela vrijednost iznosila 8.96, a kada je model bio uključen srednja kvadratna pogreška je bila manja za otprilike tri metra te je iznosila 5.202 m.

Ny-Alesund, Norveška							
NYAL isključen model ispravke				NYAL uključen model ispravke			
DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina	DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina
69	46,31619935	2,082899119	8,961389185	69	46,37915469	2,287961754	5,202015778
70	46,50661236	1,858997261	9,748198281	70	46,56851743	2,087657329	6,227706246
71	46,39748881	2,329644399	7,90517082	71	46,4418562	2,513773516	4,403894015
72	46,01635604	2,06648135	9,198813393	72	46,09733054	2,440737529	4,557846523
73	46,52265551	2,045409373	8,991769648	73	46,60532219	2,480077406	4,457280453
74	46,33982407	2,037032168	8,625389571	74	46,43071252	2,448246451	4,886605918
75	45,79136896	1,865248872	8,418938656	75	45,86593606	2,195285436	5,048992165
76	46,15044212	2,100892851	7,980777273	76	46,23617981	2,451611586	4,487633952
77	45,62726414	1,949444434	6,539769485	77	45,70959327	2,351623258	3,255861
78	46,26274181	1,904598627	7,187524772	78	46,33863031	2,339715109	3,732224291
79	46,01744959	1,949716001	7,776689304	79	46,10116772	2,336135816	4,270438971
80	45,94083281	2,204204816	7,685257835	80	46,01610035	2,582827278	4,378936377
81	46,42833312	2,041300687	8,156247051	81	46,50750733	2,413168575	4,566970267
82	46,18254125	2,140372826	9,251999104	82	46,29572248	2,557267097	5,481969263
83	46,28447093	1,878396667	9,029442499	83	46,36106268	2,319512931	5,410292704

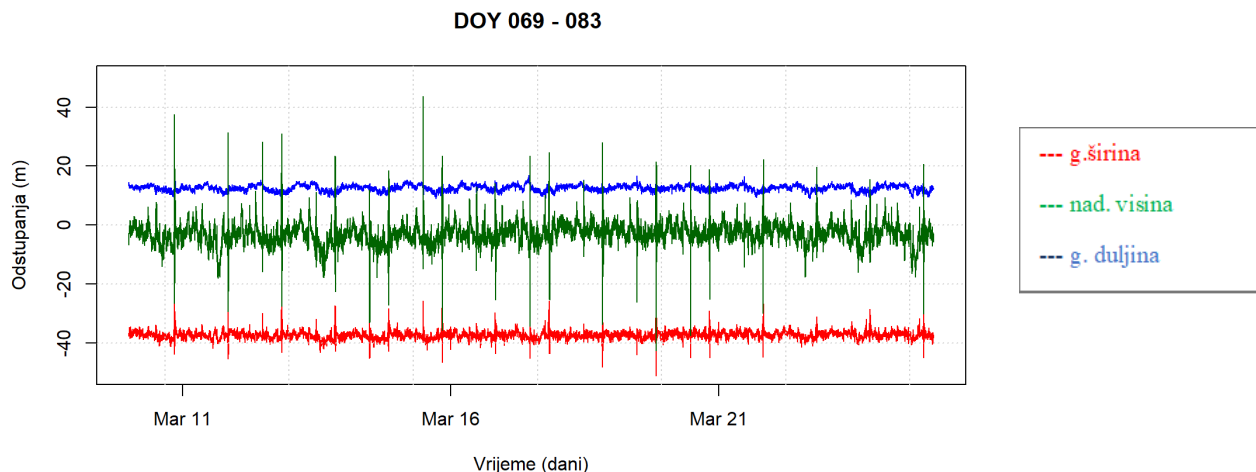
Tablica 11. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Preostali statistički podatci o odstupanjima za stanicu NYAL nalaze se u prilogu ovoga rada.

4.3.2.3 Stanica Scoresbysund/Ittoqqoormiit (SCOR)

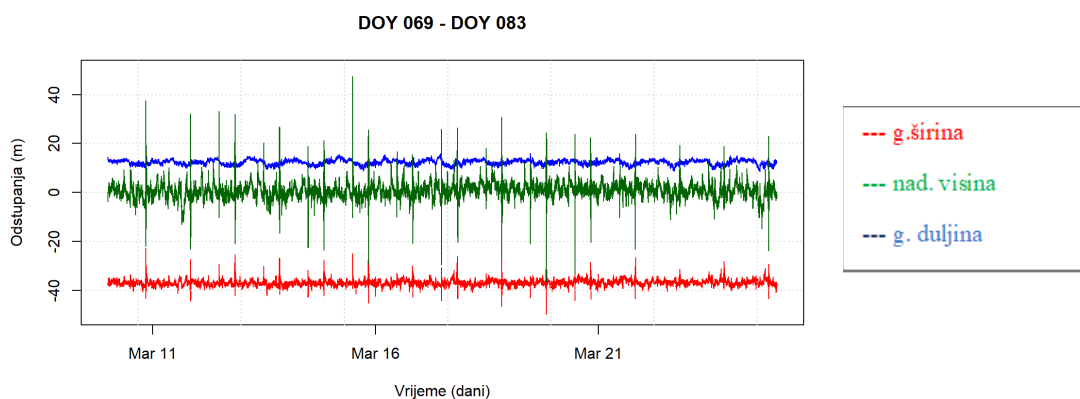
Posljednja stanica za koju su se prikupljali te analizirali podatci jest stanica SCOR smještena na Grenlandu. Kod nemodeliranih vrijednosti velike oscilacije ponovno ima nadmorska visina. Za geografsku duljinu odstupanja su oko 15 metara, a za geografsku širinu ona se kreću oko 39 metara te su više-manje konstantna.



Slika 48. Odstupanja za nemodelirane vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine (SCORE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

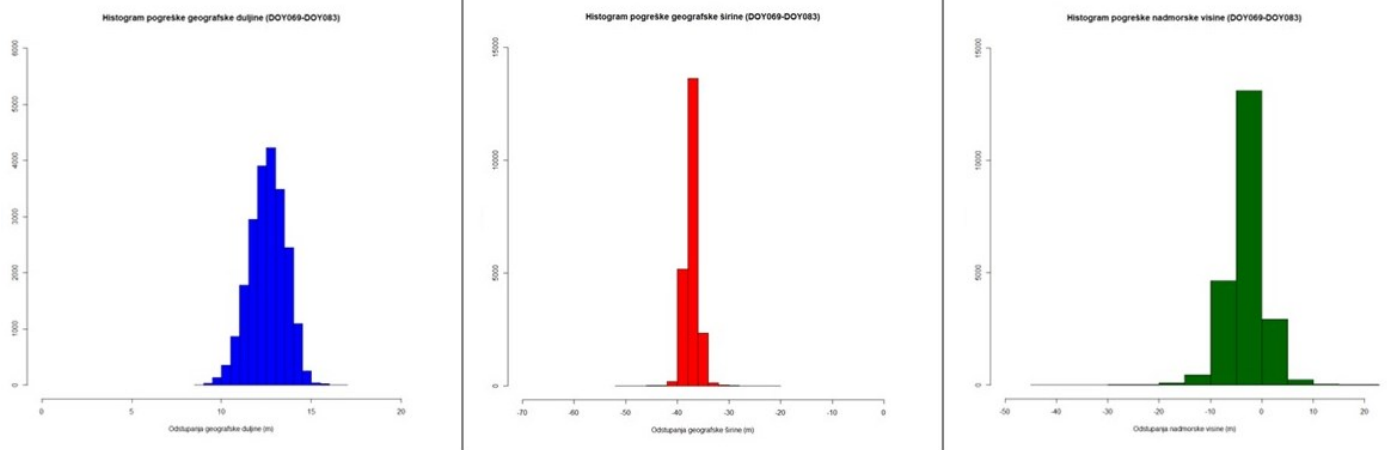
Za modelirane vrijednosti odstupanja su pokazivala sličan uzorak kao i kod isključenog modela ispravke; najviše odstupanja kod nadmorske visine čije se vrijednosti kreću od -20 do 40 metara.



Slika 49. Odstupanja modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. godinu (SCORE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

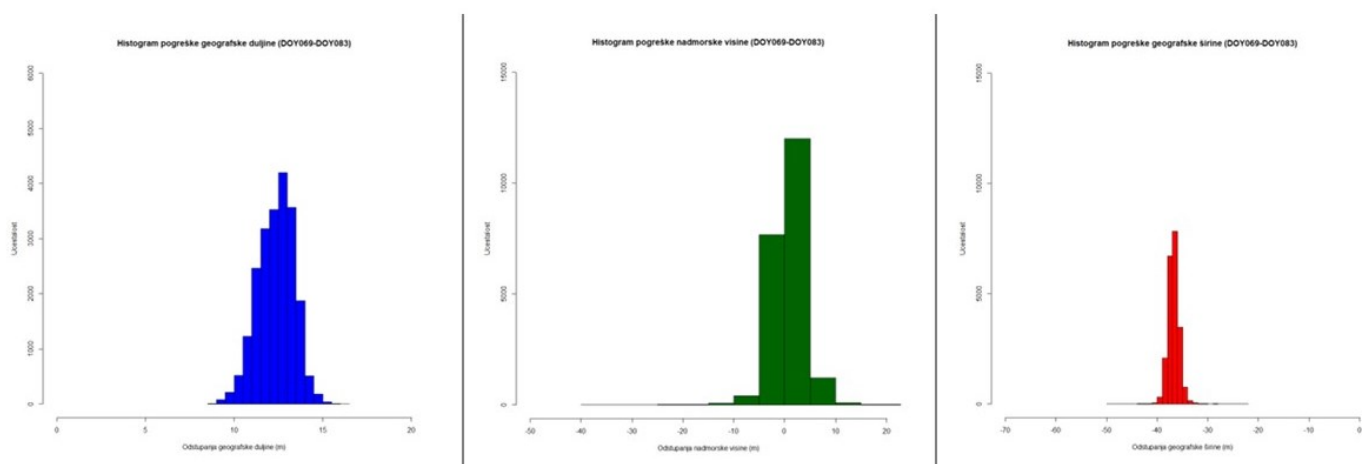
Histogrami učestalosti odstupanja nemodeliranih vrijednosti ukazuju na veliki broj odstupanja nadmorske visine te geografske širine. Kod geografske širine najviše odstupanja je bilo oko 35 metara koja su se ponavljala preko 10 000 puta. Kod geografske duljine najveća učestalost odstupanja je bila između 13 i 14 metara.



Slika 50. Histogram odstupanja nemodeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka (SCORE)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

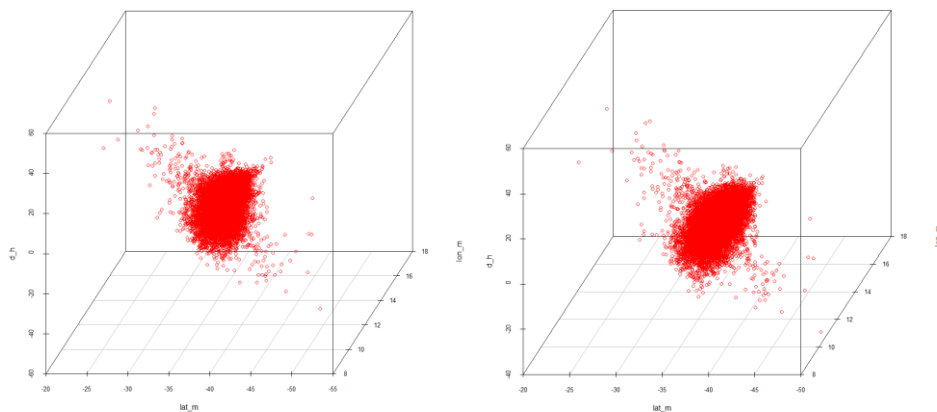
Kao i kod nemodeliranih vrijednosti, kod modeliranih učestalost odstupanja je najveća kod nadmorske visine; učestalost odstupanja od svega par metara iznosi preko 10 000 puta. Odstupanje oko nule (odnosno kada nema odstupanja) ponovilo se oko 8 000 puta. Kod geografske širine najčešće se ponavlja odstupanje od 37 metara. U pogledu geografske duljine odstupanja se najviše ponavljaju u iznosima od 10 do 15 metara. Tada je učestalost odstupanja najveća.



Slika 51. Histogram odstupanja modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. godine (SCOR)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

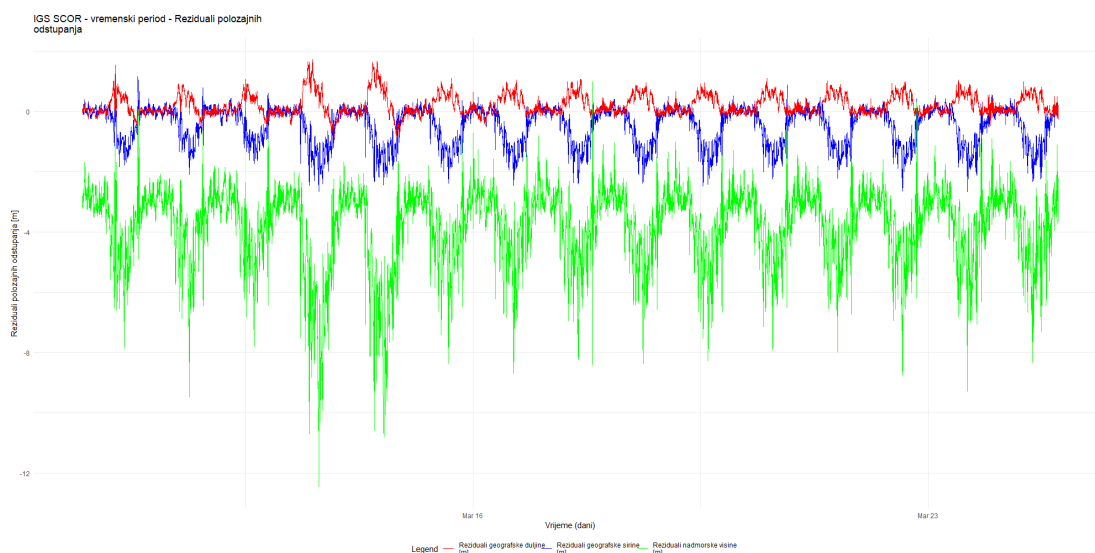
Kao i kod prijašnje dvije stanice, nakon histograma pogreške slijedi prikaz odstupanja putem 3D vizualizacije. Na sljedećoj slici (slika 48.) prikazana su odstupanja za stanicu SCOR sa uključenim i isključenim modelom ispravke.



Slika 52. 3D vizualizacija odstupanja nemodeliranih (lijevo) i modeliranih (desno) vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (SCOR)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za konkretnu analizu odstupanja potrebno je prikazati i reziduale za stanicu SCOR u promatranom periodu.



Slika 53. Reziduali za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Rezidualne vrijednosti potrebno je i „pretočiti“ u numeričke podatke, a oni nalažu slijedeće: razlika nadmorske visine prilikom uključivanja ionosferskog modela naspram isključenog iznosi 3.8 metara. Za geografsku duljinu ona iznosi oko 20 cm, a za geografsku širinu 48 cm.

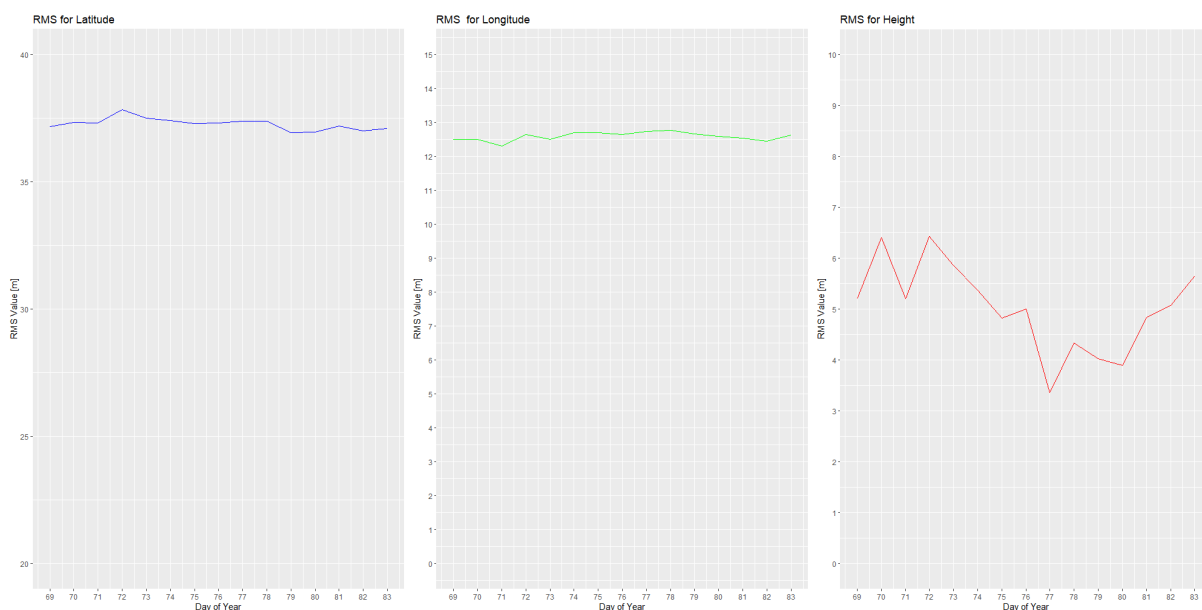
SCOR	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
Min,	-12,4608	-1,055545442	-2,66099064
1st Qu,	-4,486525	-0,029733152	-1,0054971
Median	-3,4196	0,091426657	-0,202349521
Mean	-3,831612784	0,19965755	-0,482156574
3rd Qu,	-2,921075	0,421767168	0,011889841
Max,	0,989	1,711382299	1,150869841

Tablica 12. Reziduali položajnih zapisa za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Srednja kvadratna pogreška zadnji je element prilikom istraživanja odstupanja položaja jedne stanice. Kao i kod prijašnje dvije stanice bit će prikazane srednje kvadratne pogreške prilikom uključenog i isključenog modela ispravke.

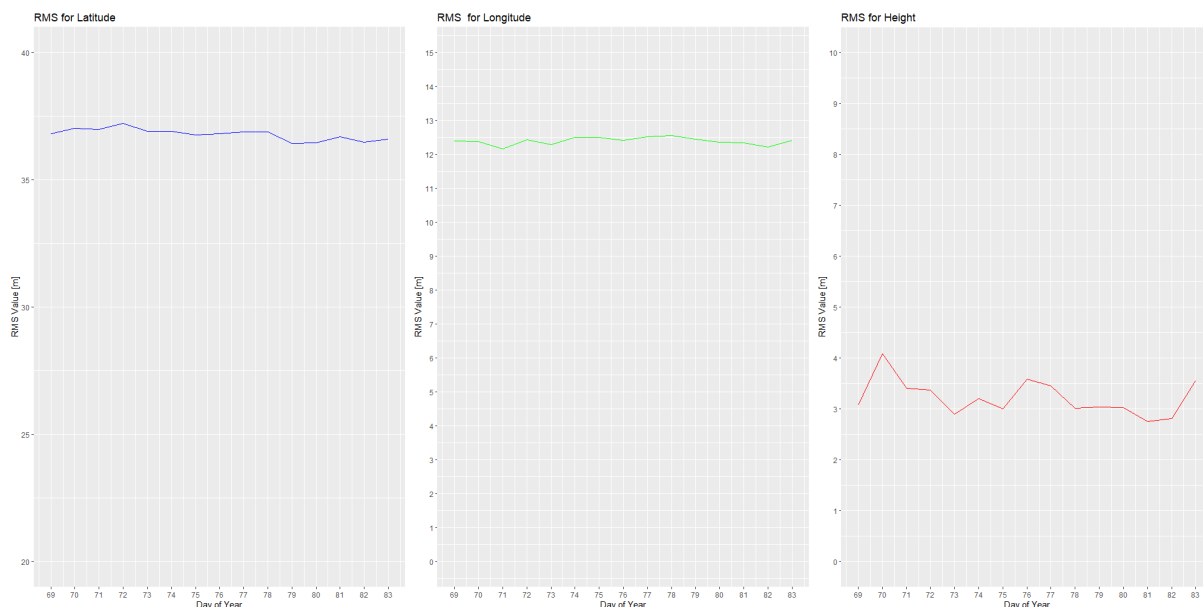
Prvi slučaj je kada je model bio isključen. Situacija srednje kvadratne pogreške kroz cijeli promatrani period je naizgled vrlo slična situaciji na stanici NYAL. Iznosi za srednju kvadratnu pogrešku bili su najveći iznosom kod geografske širine. Najveće razlike između maksimuma i minimuma su bile kod nadmorske visine što se vidi na prikazanom grafu crvenom bojom.



Slika 54. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR bez modela ispravke (OFF)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Kao i kod vrijednosti kada je model ispravke bio isključen, situacija je bila vrlo slična; najveća odstupanja, odnosno razlika između maksimuma i minimuma u pogledu nadmorske visine.



Slika 55.Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR s modelom ispravke (ON)

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Konkretno brojke o iznosima srednje kvadratne pogreške su sljedeće: jasne razlike prilikom isključenog i uključenog modela. Na primjer srednja kvadratna pogreška geografske duljine na kraju perioda promatranja iznosi 12.669 m, a kod uključenog modela ispravke ona iznosi 12.4247 m što je za otprilike 0.20 m manje. Kod nadmorske visine te su razlike najveće.

Scoresbysund/Ittoqqoormiit, Grenland							
SCOR isključen model ispravke				SCOR uključen model ispravke			
DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina	DO Y	Geografska širina	Geografska duljina	Nadmorska visina
69	37,16413067	12,51005984	5,209009026	69	36,8259755	12,39638738	3,075952355
70	37,35276818	12,5121523	6,408732993	70	37,02958814	12,37541199	4,083376294
71	37,3246786	12,31049279	5,204604871	71	36,98015567	12,17007601	3,404008253
72	37,83321586	12,6503186	6,434336569	72	37,21668215	12,43550717	3,372925664
73	37,51518356	12,50063411	5,857863409	73	36,9057881	12,28828472	2,898337491
74	37,41979827	12,70760039	5,373177404	74	36,90750893	12,51245351	3,206401847
75	37,29466001	12,7107158	4,820933002	75	36,77299991	12,50512568	3,003518599
76	37,31255347	12,64122014	4,999460977	76	36,81324735	12,41357197	3,579304899
77	37,38607228	12,73877978	3,353745048	77	36,88426173	12,51987972	3,454314304
78	37,39899072	12,77862968	4,329531691	78	36,88452079	12,55938809	3,016082529

79	36,92670466	12,66912811	4,020619745	79	36,44787853	12,44955	3,041922085
80	36,95421763	12,59243998	3,897278831	80	36,46598058	12,37042686	3,023532293
81	37,20489924	12,5494333	4,82974554	81	36,70230285	12,34754383	2,756766472
82	37,00788462	12,45197416	5,070426958	82	36,49444547	12,22807801	2,812651274
83	37,10981626	12,63478735	5,642685581	83	36,60614444	12,42474177	3,551115903

Tablica 13. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR

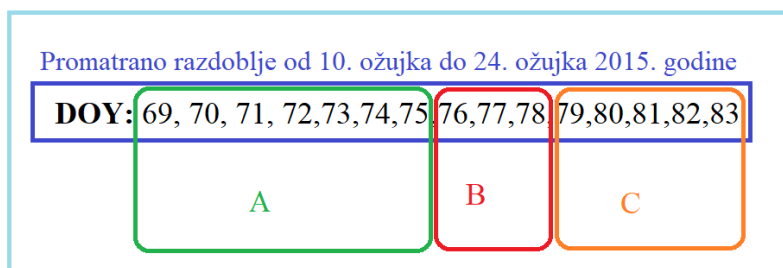
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Ostali statistički parametri nalaze se na kraju, u prilogu ovoga rada.

4.4. ANALIZA ODSUPANJA POLOŽAJA KROZ PERIOD OD 15 DANA U RAZLIČITIM UVJETIMA SVEMIRSKOG VREMENA

Nakon konkretnih podataka o odstupanjima položaja iskazanih za svaku stanicu posebno, potrebno je staviti naglasak na analizu odstupanja prije, poslije i za vrijeme geomagnetske oluje. Stoga, period promatranja od 15 dana koji počinje datumom 10. ožujak 2015. godine i završava datumom 24. ožujka 2015. godine podijeljen je u tri razdoblja, a to su⁹⁷:

- I. A razdoblje koje uključuje dane od 10. do 16. ožujka
- II. B razdoblje od 17. do 19. ožujka
- III. C razdoblje od 20. do 24. ožujka



Slika 56. Kategorizacija perioda promatranja

Izvor: Izradio autor

Period promatranja podijeljen je u tri dijela, ovisno o stanju svemirskog vremena, odnosno transferu energije i materije sa Sunca. Prvih sedam dana karakteristično je po tome što je transfer energije i materije bio relativno slab te se zato period A još može i nazvati period *relativno stabilnog svemirskog vremena* koje završava na dan 17. ožujka (dan Sv. Patrika) kada

⁹⁷ Dana kategorizacija nastala je usporedbom svemirskog vremena kroz period od 15 dana u mjesecu ožujku. Na dan 10. ožujak K_p vrijednost je bila mnogo manja nego na dan 17. ožujak te je onda na temelju toga dobila i naziv „relativno stabilan“.

nastupa vrlo jaka geomagnetska oluja (B period). Taj period od 17. ožujka u koji je još uračunato i dva dana nakon geomagnetske oluje može se nazvati i periodom *vrlo intenzivnog svemirskog vremena i geomagnetske oluje*. Nakon toga vrlo intenzivnog svemirskog vremena nastupa period *blage i umjerene Sunčeve aktivnosti* (period C). Svemu tome svjedoči arhiva svemirskog vremena te je na temelju nje nastala ova kategorizacija. U ta tri scenarija sagledat će se te analizirati odstupanja te provesti kratka analiza o odstupanjima na sve tri referentne stanice.

4.4.1. Period relativno stabilnog svemirskog vremena (Period A)

Period relativno stabilnog svemirskog vremena jest period od dana 69 do dana 75. U tom periodu K_p vrijednost nije prelazila iznose veće od 4 te nije dolazilo do većeg transfera energije i materije sa Sunca.

Vrijednosti količine slobodnih elektrona u tom periodu nisu prelazile iznose veće od 10 TEC jedinica. Najveći iznos je bio na dan 13. ožujak zabilježen kod stanice SCOR. Na taj isti dan zabilježene su i najveće vrijednosti i kod ostale dvije stanice: na stanici THU, srednja TEC vrijednost na taj dan iznosila je 9.194, a na stanici NYAL srednja TEC vrijednost je bila u iznosu od 6.702.

Total Electron Content (TEC)			
DOY	THULE	SCOR	NYAL
DOY 069 (10.3.2015)	Mean: 7,404	Mean: 8,331	Mean: 6,971
DOY 070 (11.3.2015)	Mean: 7,953	Mean: 10,345	Mean: 8,179
DOY 071 (12.3.2015)	Mean: 8,551	Mean: 7,745	Mean: 6,705
DOY 072 (13.3.2015)	Mean: 9,194	Mean: 10,166	Mean: 6,702
DOY 073 (14.3.2015)	Mean: 7,881	Mean: 8,751	Mean: 6,281
DOY 074 (15.3.2015)	Mean: 8,526	Mean: 8,062	Mean: 6,532
DOY 075 (16.3.2015)	Mean: 5,851	Mean: 8,187	Mean: 8,058

Tablica 14. Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 10. do 16. ožujka 2015. godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za stanicu NYAL srednje vrijednosti odstupanja su bile sljedeće: za geografsku širinu odstupanja su bila oko 46 m, s time da je najmanja vrijednost bila 45 metara na dan 16. ožujak. Ako je za usporediti taj dan iznos sa i bez uključenog modela ispravke, uočava se da je iznos bio za otprilike 0.10 m manji kada je model ispravke bio uključen. Za nadmorsku visinu i geografsku duljinu također se uočavaju manja odstupanja kada je model ispravke bio uključen. Ostale srednje vrijednosti za period A nalaze se u sljedećoj tablici.

STATISTIČKI PODATCI - NYAL (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - NYAL (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY 69	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY 69	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
Mean	46,37089002	-2,052151391	-4,541533146	Mean	46,30681598	-1,833692525	-8,477987947
70				70			
Mean	46,55337899	-1,932965122	-4,881333611	Mean	46,49018751	-1,670818126	-8,884697847
71				71			
Mean	46,43207854	-2,396721381	-3,564263611	Mean	46,38751124	-2,147830777	-7,488762639
72				72			
Mean	46,08743925	-2,158580937	-3,747871111	Mean	46,00530328	-1,746540473	-8,699326667
73				73			
Mean	46,59895563	-2,218212264	-3,702147778	Mean	46,51540064	-1,789394784	-8,656304097
74				74			
Mean	46,42467934	-2,118787979	-4,355980417	Mean	46,33277454	-1,728748666	-8,340500208
75				75			
Mean	45,85733882	-2,028559234	-3,961759722	Mean	45,781682	-1,641945793	-7,873988194

Tablica 15. Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 10. do 16. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za sljedeću stanicu, SCOR, najveće srednje vrijednosti za geografsku širinu su bile na dan 13. ožujak. Tada je odstupanje iznosilo 37.8 metara, odnosno 37.2 metara kada je model ispravke bio uključen. Najveća srednja vrijednost odstupanja geografske duljine je bila 16.3., a najveća srednja vrijednost odstupanja nadmorske visine je bilo također na dan 13. ožujak, kao i u pogledu geografske širine.

STATISTIČKI PODATCI - SCOR (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - SCOR (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
69				69			
Mean	- 36,808146040	12,368632680	0,319794028	Mean	-37,13954029	12,48193768	-3,29312715
70				70			
Mean	- 37,010869120	12,350509930	- 0,332327153	Mean	-37,33005360	12,48363870	-3,97235708
71				71			
Mean	- 36,960850230	12,132048470	0,566749653	Mean	-37,30264840	12,26891827	-3,05266944
72				72			
Mean	- 37,196979920	12,376921530	0,361835208	Mean	-37,80503905	12,58758556	-4,27794958
73				73			
Mean	- 36,891271510	12,251334250	0,437374514	Mean	-37,49283707	12,47256263	-4,17291972
74				74			
Mean	- 36,891701490	12,454041070	0,225417083	Mean	-37,39851024	12,65646770	-3,52914479
75				75			
Mean	- 36,755165950	12,473634750	0,614410903	Mean	-37,27724668	12,67704661	-3,08212340

Tablica 16.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 10. do 16. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za posljednju stanicu THU, srednje vrijednosti odstupanja geografske širine bile su manje nego kod prijašnje dvije stanice. Najveća srednja vrijednost odstupanja geografske širine bila je na dan 12. ožujak. Najveća srednja vrijednost odstupanja geografske duljine iznosila je 1.20 m i to na dan 13. ožujak. Za nadmorsku visinu najveće srednje vrijednosti odstupanja položaja su bile na dane 12. i 13. ožujak.

STATISTIČKI PODATCI - THU (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - THU (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
69				69			
Mean	-5,027398069	0,645695886	0,477572986	Mean	-5,145553277	0,626236617	-2,894314583
70				70			
Mean	-4,966090156	0,595392978	-0,021635069	Mean	-5,037594024	0,581748069	-3,383575556
71				71			
Mean	-5,51703554	0,801691379	-0,058335278	Mean	-5,605352713	0,79953991	-3,351195139
72				72			
Mean	-5,11709313	1,205808783	0,672090278	Mean	-5,327752651	1,192617796	-3,493948472
73				73			
Mean	-5,141148794	0,873438956	0,916667132	Mean	-5,350343167	0,865646649	-3,223703768

74				74			
Mean	-4,859190478	0,889497881	-0,456061042	Mean	-4,896831606	0,895288258	-3,634783611
75				75			
Mean	-5,350436102	1,087359409	-0,515567708	Mean	-5,390023065	1,093995756	-3,627808958

Tablica 17. Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 10. do 16. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Što se tiče reziduala za ovaj period, srednja vrijednost reziduala za stanicu NYAL za nadmorsku visinu je iznosila 4.23 metra, a za geografsku duljinu i širinu te su vrijednosti bile manje od 1 metar.

Za SCOR stanicu, srednja vrijednosti reziduala za nadmorsku visinu je iznosila 3.9 metra, 0.17 m za geografsku duljinu te 0.46 metra za geografsku širinu.

Za posljednju stanicu THU, vrijednosti su bile sljedeće: srednja vrijednost nadmorske visine je bila 3.5 metra, za geografsku širinu taj je iznos bio oko nule dok je za geografsku duljinu bio iznos od 0.06 metra.

STANICA	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
NYAL			
Min.	-11,4869	-0,928881664	-1,090420559
1st Qu.	-4,97375	-0,032078592	-0,13156608
Median	-3,6047	0,063175731	-0,03700296
Mean	-4,238486411	0,335437603	-0,072165492
3rd Qu.	-3,1934	0,74020791	0,031891439
Max.	-1,6396	2,558265045	1,3023264
SCOR			
Min.	-12,4608	-1,055545442	-2,660657281
1st Qu.	-4,7027	-0,052784696	-0,942936539
Median	-3,41885	0,059763264	-0,16006836
Mean	-3,939077917	0,174433499	-0,46155587
3rd Qu.	-2,916075	0,394400419	0,014473381
Max.	0,6175	1,711382299	1,150869841
THU			
Min.	-8,8143	-0,646275156	-1,318994399
1st Qu.	-3,6651	-0,072230905	-0,164790961
Median	-3,2709	-0,009184087	-0,047559359
Mean	-3,51729036	-0,006257823	-0,110654174
3rd Qu.	-3,0194	0,065530402	0,00477816
Max.	-1,258	0,803025533	0,53026464

Tablica 18. Reziduali za period od 10. do 16. ožujka za sve tri referentne stanice

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Kompletni podatci o srednjoj kvadratnoj pogrešci nalaze se u tablicama broja **9, 11, i 13**. te se na temelju njih može protumačiti sljedeće: u periodu od dana 069 do dana 075 na stanici NYAL najveći iznosi srednjih kvadratnih pogrešaka bili su na dan 11. i 12. ožujak. Za stanicu SCOR najveće vrijednosti su bile na dan 13. ožujak (DOY 72), a za posljednju stanicu THU najveće vrijednosti su bile u periodu od 11. do 13. ožujka.

Preostali statistički podatci nalaze se u prilogu rada.

4.4.2. Period intenzivnog svemirskog vremena i geomagnetska oluja (Period B)

Dan 76, odnosno 17. ožujak (dan Sv. Patrika) obilježila je iznimno snažna geomagnetska oluja. U tom periodu od tri dana s početkom oluje K_p vrijednosti su se penjale na iznose iznad 4, do maksimalnih 8 što je duplo više nego u periodu do geomagnetske oluje (periodu A).

Srednje TEC vrijednosti za stanicu NYAL bile su najveće u tom periodu na dan 17.3. kada su iznosile oko 7 TEC jedinica. Za stanicu SCOR, taj dan je srednja vrijednost TEC jedinica iznosilo 6, a prilikom proračuna za stanicu THU taj je iznos bio veći od obje stanice te je iznosio 8 TEC jedinica.

Total Electron Content (TEC)			
DOY	THULE	SCOR	NYAL
DOY 076 (17.3.2015)	Mean: 7,131	Mean: 6,554	Mean: 8,787
DOY 077 (18.3.2015)	Mean: 5,391	Mean: 8,354	Mean: 5,805
DOY 078 (19.3.2015)	Mean: 6,113	Mean: 6,588	Mean: 5,769

Tablica 19.Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 17. do 19. ožujka 2015. godine
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL su: ponovna odstupanja u iznosu od 46 metara za geografsku širinu te se tijekom tri dana mijenja za otprilike za 1 metar. Geografska duljina svoje vrijednosti zauzima u iznosima od 2 metra, a nadmorska visina u iznosima od 6

do 7.5 metara prilikom isključenog modela te od 2.8 do 3.5 metara kada je uključen model ispravke.

STATISTIČKI PODATCI - NYAL (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - NYAL (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
76				76			
Mean	46,22356688	-2,216754678	-3,568095	Mean	46,13648785	-1,822462741	-7,482225694
77				77			
Mean	45,7032197	-2,20660751	-2,264092431	Mean	45,62093418	-1,806814589	-6,205264792
78				78			
Mean	46,33350345	-2,153048571	-2,816518403	Mean	46,25708793	-1,744493319	-6,765377083

Tablica 20.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 17. do 19. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Za stanicu SCOR, srednje vrijednosti pogreške geografske širine na dan geomagnetske oluje iznosi 36.78 m s uključenim modelom ispravke. Kada je taj model bio isključen, pogreška je iznosila za otprilike 1 metar više, tj. 37.28 m. Najveća srednja vrijednost odstupanja geografske duljine je bila na dan 18.3., a za nadmorsku visinu najveća vrijednost s uključenim modelom bila je također na 18.3. 2015. godine.

STATISTIČKI PODATCI - SCOR (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - SCOR (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
76				76			
Mean	- 36,786563210	12,343525610	0,987011736	Mean	-37,28347087	12,57844179	-2,73305049
77				77			
Mean	- 36,865215260	12,492017470	2,384221458	Mean	-37,37190564	12,71516461	-1,32175021
78				78			
Mean	- 36,867896840	12,532191270	1,293319041	Mean	-37,38098893	12,75225470	-2,48492078

Tablica 21.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 17. do 19. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Kod stanice THU, situacija je bila sljedeća: najveća srednja vrijednost odstupanja geografske širine je bila dan nakon geomagnetske oluje, 18.3., te je iznosila oko 5.4 m prilikom

uključenog te isključenog modela ispravke. Geografska duljina ima najveće vrijednosti također na dan 18.3. kao i nadmorska visina – prilikom uključenog modela ispravke.

STATISTIČKI PODATCI - THU (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - THU (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
76				76			
Mean	-5,268566127	0,687677657	0,482217292	Mean	-5,286099937	0,711432715	-2,674733333
77				77			
Mean	-5,47566118	1,261834581	1,321631969	Mean	-5,498255397	1,271949428	-1,855989908
78				78			
Mean	-4,990677771	0,946259887	0,8749175	Mean	-5,011516321	0,950536758	-2,296640069

Tablica 22.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 17. do 19. ožujka
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Iznosi reziduala za period B u mjesecu ožujku su: najveće vrijednosti za sve tri stanice zauzima nadmorska visina, dok su rezidualne vrijednosti za preostale dvije vrijednosti bile manje od 1 m. Vrijednost nadmorske visine za stanicu NYAL je iznosila 3.9 metara, 3.7 metara za stanicu SCOR i 3.16 metara za stanicu THU.

	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
NYAL			
Min.	-9,6347	-0,37049867	-1,037416321
1st Qu.	-4,62725	0,013260289	-0,132538381
Median	-3,51295	0,143068173	-0,0572268
Mean	-3,934720579	0,400880037	-0,081926693
3rd Qu.	-3,15085	0,854579238	0,006694979
Max.	-1,7871	1,68110171	0,56860104
SCOR			
Min.	-8,3949	-0,277472295	-2,488532399
1st Qu.	-4,3895	-0,004769925	-1,03574952
Median	-3,4433	0,12208781	-0,2283516
Mean	-3,734747835	0,226043636	-0,505561627
3rd Qu.	-2,90325	0,445403353	0,006444961
Max.	0,989	1,059814246	0,718168559
THU			
Min.	-4,6788	-0,262018125	-0,46959312
1st Qu.	-3,3604	-0,034149282	-0,060893759
Median	-3,1676	0,011357223	-0,012445441
Mean	-3,168662323	0,012729513	-0,020310031
3rd Qu.	-2,9688	0,059217959	0,027224401
Max.	-1,8805	0,303230099	0,41881128

Tablica 23.Reziduali za period od 17. do 19. ožujka za sve tri referentne stanice
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Vrijednosti srednje kvadratne pogreške sadržane u tablicama **9,11 i 13.** pokazuju da su prilikom uključenog modela za sve tri stanice najveće vrijednosti geografske širine bile na dan 18. ožujak (s uključenim modelom ispravke). Za stanicu NYAL vrijednost srednje kvadratne pogreške za g. duljinu bila je najveća na dan 17. ožujak i prilikom uključenog i isključenog modela ispravke. Stanica SCOR najveće RMS vrijednosti za geografsku duljinu imala je na dan 19. ožujak, no iako je bio veći iznos, nije se mnogo razlikovao od iznosa na prijašnji dan. Ako je analizirati RMS vrijednosti za stanicu THU, može se uvidjeti da je najveće iznose za geografsku duljinu imala na dan 18. ožujak.

Preostali statistički podatci nalaze se u prilogu ovoga rada.

4.4.3. Period umjerene Sunčeve aktivnosti (Period C)

Nakon perioda kada je bila vrlo intenzivna geomagnetska oluja, dolazi period kada je K_p iznosio iznad 4, ali nije bio toliko nizak kao na početku promatranja. Stoga, uspoređujući period prije geomagnetske oluje, ovaj se period može nazvati period umjerene Sunčeve aktivnosti.

Ako je za promatrati stanje TEC jedinica u „post-olujnom“ periodu, može se uočiti da je najveće srednje vrijednosti TEC jedinica bilo kod stanice THU na dan 23.3.2015. godine.

Total Electron Content (TEC)			
DOY	THULE	SCOR	NYAL
DOY 079 (20.3.2015)	Mean: 7,993	Mean: 7,071	Mean: 6,495
DOY 080 (21.3.2015)	Mean: 6,938	Mean: 8,612	Mean: 8,278
DOY 081 (22.3.2015)	Mean: 7,966	Mean: 8,365	Mean: 7,409
DOY 082 (23.3.2015)	Mean: 10,038	Mean: 9,119	Mean: 8,062
DOY 083 (24.3.2015)	Mean: 9,378	Mean: 9,780	Mean: 8,160

Tablica 24. Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 19. do 24. ožujka 2015. godine

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Srednja vrijednost odstupanja geografske širine za stanicu NYAL je bila na dan 21.3. te je iznosila 46.5 metara te se odnosi na položaj s modelom ispravke. Na isti dan bez modela ispravke iznosila je 46.4, što je za 0.1 m manje. Za geografsku duljinu s uključenim modelom ispravke odstupanje je iznosilo oko 2 metra, dok je s isključenim modelom taj iznos bio čak i nešto manji. Te iste vrijednosti za nadmorsku visinu bile su mnogo manje kada je model ispravke bio uključen.

STATISTIČKI PODATCI - NYAL (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - NYAL (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
79				79			
Mean	46,09351959	-2,175591878	-3,350085	Mean	46,00924248	-1,777149967	-7,311536389
80				80			
Mean	46,00378834	-2,335381505	-3,123307917	Mean	45,92757777	-1,934368005	-7,052126806
81				81			
Mean	46,49944759	-2,198245287	-3,752695486	Mean	46,41985195	-1,805323785	-7,677672153
82				82			
Mean	46,28819543	-2,327524188	-4,552648264	Mean	46,17341889	-1,925123955	-8,520085833
83				83			
Mean	46,35416004	-2,123153491	-4,397644306	Mean	46,27707131	-1,717156344	-8,401315139

Tablica 25.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 20. do 24. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Na stanici SCOR srednje vrijednosti odstupanja također su bile manje prilikom uključenog modela ispravke. Na primjer, na dan 79 s modelom ispravke srednja vrijednost odstupanja je iznosila 36.43 m, dok je bez modela ispravke ta vrijednost iznosila 36.9 m. Najveću razliku između uključenog modela ispravke i isključenog modela ima nadmorska visina.

STATISTIČKI PODATCI - SCOR (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - SCOR (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
79				79			
Mean	- 36,428576550	12,427260690	1,606120139	Mean	-36,91031856	12,64686127	-2,11539896
80				80			
Mean	- 36,444560380	12,327785960	1,694246421	Mean	-36,93575642	12,55154806	-2,02185580
81				81			

Mean	- 36,690568040	12,309890190	0,739774514	Mean	-37,18641603	12,51496967	-3,01241729
82				82			
Mean	- 36,476366330	12,174368710	0,507206111	Mean	-36,98821700	12,40624752	-3,23306576
83				83			
Mean	- 36,586357380	12,371240670	0,425682153	Mean	-37,09051585	12,58665261	-3,34048819

Tablica 26.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 20. do 24. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Konačno, odstupanja u zadnjem periodu C, za stanicu THU ukazuju na: najveće srednje vrijednosti odstupanja za geografsku širinu su bile na dan 20.3. 2015. godine. Također, kao i kod stanice SCOR i NYAL, najveće razlike između odstupanja sa i bez modela ispravke su u pogledu nadmorske visine.

STATISTIČKI PODATCI - THU (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				STATISTIČKI PODATCI - THU (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA	DOY	G, ŠIRINA	G, DULJINA	NAD, VISINA
79				79			
Mean	-5,077644373	1,016000094	1,179034028	Mean	-5,094855549	1,027793902	-1,986245417
80				80			
Mean	-5,292337164	1,173127194	0,765564583	Mean	-5,313882175	1,184140032	-2,397049653
81				81			
Mean	-5,263142776	0,936764849	0,649887778	Mean	-5,284887957	0,941044271	-2,535319931
82				82			
Mean	-4,902346631	0,757162839	0,350632847	Mean	-4,902333204	0,789259571	-2,8042875
83				83			
Mean	-4,972749794	1,027107539	0,320902708	Mean	-4,993087995	1,016488313	-2,816303958

Tablica 27.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 20. do 24. ožujka

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Gledajući srednje vrijednosti reziduala za sve tri referentne stanice može se uočiti da najveće vrijednosti i u ovom periodu ima nadmorska visina. Rezidualne vrijednosti za geografsku duljinu te geografsku širinu ne prelaze iznose od jedan metar. Najveća rezidualna vrijednost za geografsku duljinu u ovom periodu je kod stanice NYAL, kao i najveća rezidualna vrijednost za geografsku širinu.

	NADMORSKA VISINA	GEOGRAFSKA DULJINA	GEOGRAFSKA ŠIRINA
NYAL			
Min.	-10,2894	-0,425673421	-1,213430401
1st Qu.	-4,55015	0,006870174	-0,15156768
Median	-3,53285	0,147986108	-0,050670719
Mean	-3,957271069	0,400154859	-0,086389719
3rd Qu.	-3,1733	0,84770373	0,01313994
Max.	-1,5061	1,710651993	0,53048688
SCOR			
Min.	-9,2848	-0,482449153	-2,66099064
1st Qu.	-4,3366	-0,008407689	-1,039805401
Median	-3,4143	0,12201357	-0,24246384
Mean	-3,739254285	0,219145941	-0,496959835
3rd Qu.	-2,93585	0,44211823	0,01150092
Max.	0,2839	1,087060355	0,877292401
THU			
Min.	-4,8732	-0,337482863	-0,574045919
1st Qu.	-3,36365	-0,036587592	-0,05911584
Median	-3,1581	0,004022889	-0,01294548
Mean	-3,161045681	0,009712715	-0,016165228
3rd Qu.	-2,95585	0,055958255	0,03355824
Max.	-0,6927	0,387025193	0,5894916

Tablica 28. Reziduali za period od 20. do 24. ožujka za sve tri referentne stanice

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

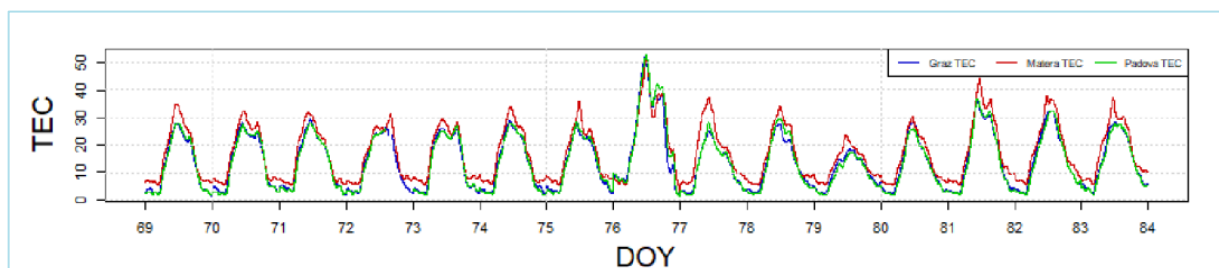
Na kraju, potrebno je i osvrnuti se na srednju kvadratnu pogrešku za period od 20. do 24. ožujka. Naime kako je iskazano u tablicama rednoga broja **9.**, **11.** te **13.**, najveće srednje kvadratne pogreške za sve tri stanice su na dane 21. i 22. ožujak. Najveće razlike srednje kvadratne pogreške između uključenog i isključenog modela ispravke ima nadmorska visina.

Preostali statistički opisi nalaze se u prilogu ovoga rada.

5. RASPRAVA I USPOREDBA REZULTATA SA PRIJAŠNJIM ISTRAŽIVANJIMA

Osnovni zadatak ovog istraživačkog rada bio je istražiti utjecaj ionosferskog kašnjenja na dobivanje položaja putem američkog GPS sustava. Uz to, naglasak se stavio na korekciju ionosferske pogreške uporabom Klobucharevog modela ispravke. Za istraživanje uzele su se tri referentne stanice smještene pri sjevernom polu, a za period istraživanja uzet je period kada je nastupila vrlo jaka geomagnetska oluja – ožujak 2015. godine. U ovom poglavlju bit će sadržana rasprava te usporedba s rezultatima na drugim geografskim područjima u istom vremenskom periodu od 15 dana u mjesecu ožujku. Komentirat će se rezultati o TEC vrijednostima, položajnim odstupanjima, rezidualima te rezultati o srednjoj kvadratnoj pogrešci.

Vrijednosti slobodnih elektrona za sve tri referentne stanice u ožujku ne prelaze vrijednosti od 25 TEC jedinica. Najveća vrijednost zabilježena je na stanici SCOR čija je vrijednost TEC jedinica iznosila maksimalnih 27 i to na dan 23. ožujak, nekoliko dana nakon geomagnetske oluje. Ako se pregledava područje nižih geografskih širina tada su TEC vrijednosti dosežale mnogo veće iznose.



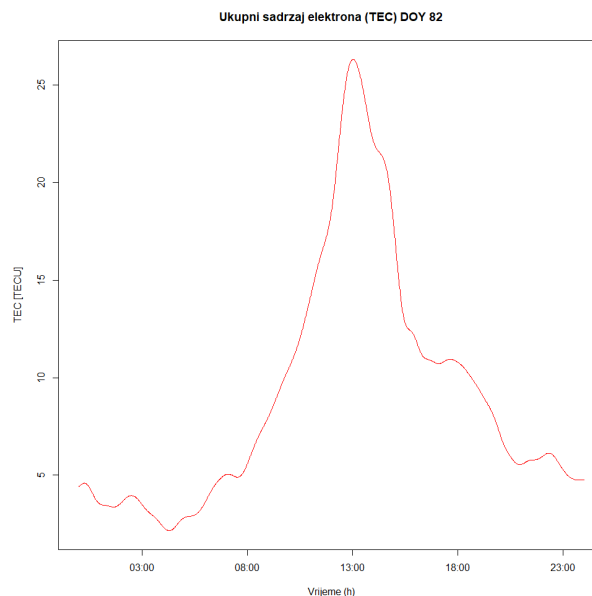
Slika 57. Iznos TEC jedinica za stanice Graz, Matera i Padova u istom periodu promatranja tijekom 2015. godine

Izvor: Brčić D., Kos S., Pongračić B., Žic A. (2020): *On GPS L1 Positioning Error's Estimation in the Adriatic Region*, Pomorski zbornik 58 (2020), 169-184, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet Rijeka, p. 117, online:

<https://hrcak.srce.hr/file/349692>

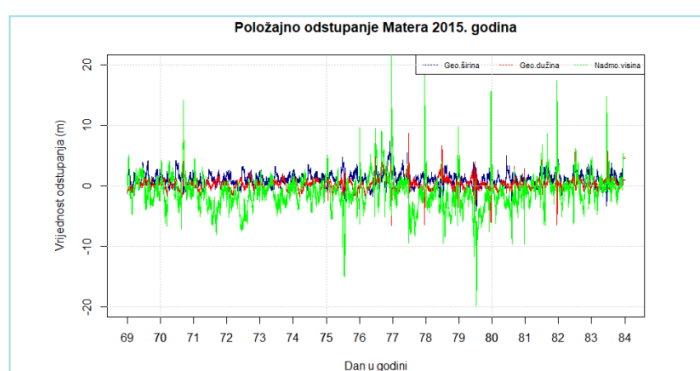
Na primjeru stanica Graz, Padova i Matera maksimalne TEC vrijednosti su bile iznad 20 te su za vrijeme geomagnetske oluje dosegle vrijednost od otprilike 50 TEC jedinica⁹⁸.

⁹⁸ Brčić D., Kos S., Pongračić B., Žic A. (2020): *On GPS L1 Positioning Error's Estimation in the Adriatic Region*, Pomorski zbornik 58 (2020), 169-184, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet Rijeka, p. 117, online: <https://hrcak.srce.hr/file/349692>



Slika 58. Najveći iznos TEC jedinica - stanica SCOR na dan 23. ožujak 2015
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

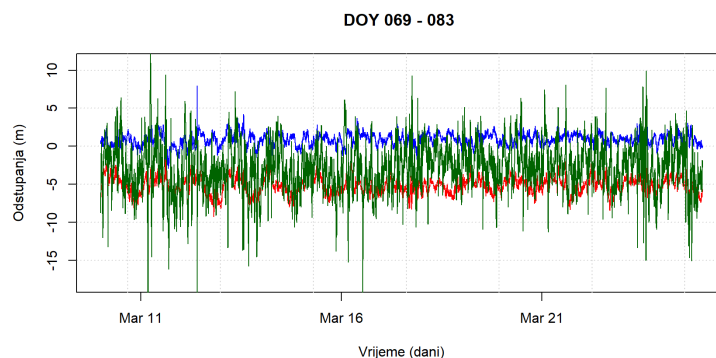
Ako se izolira samo jedan period, a to je kada je nastupila geomagnetska oluja (dan *Sv. Patrika*) odstupanja su pratila jednak uzorak kao i dane prije; nije dolazilo do novih i mnogo izraženijih odstupanja naspram prijašnjih dana. Do mnogo većih odstupanja nije dolazilo na niti jednoj od tri referentne stanice. Odstupanja su općenito bila takva da je najveće razlike između minimuma i maksimuma imala nadmorska visina. Ako je za usporediti primjerice sa stanicom Matera za isti period u 2015. godini, uočljivo je da su odstupanja primjerice za nadmorsku visinu počela imati veće oscilacije nakon geomagnetske oluje⁹⁹.



Slika 59. Položajna odstupanja na primjeru stanice Matera u istom periodu promatranja tijekom 2015. godine
Izvor: Žic A. (2018); *Strukturna analiza odstupanja položaja određenih satelitskim navigacijskim sustavom GPS uslijed učinaka svemirskog vremena*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka, p.81

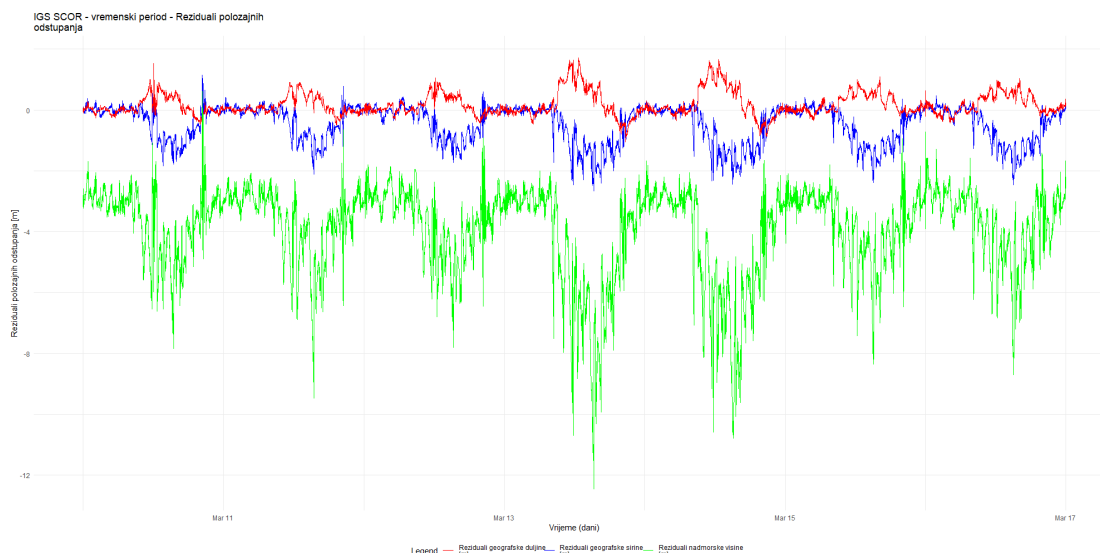
⁹⁹ Žic A. (2018.): *op.cit.* p. 81

Odstupanja nadmorske visine na stanicama smještenim pri polovima su općenito imale velike oscilacije i prije i poslije nastupa geomagnetske oluje.



Slika 60. Nemodelirani zapisi odstupanja stanice THU u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine
Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Nakon odstupanja položaja, potrebno je sagledati i rezidualne, odnosno koje su razlike između modeliranih i nemodeliranih zapisa. Reziduali su osnovni pokazatelj učinkovitosti modela ispravke ionosferskog kašnjenja. Postojanjem reziduala znači da postoji i razlika između zapisa nastala uporabom modela i zapisa bez modela ispravke. Ako je rezidual jednak nuli, tada znači da nema razlike između zapisa, odnosno što je veći iznos reziduala to je veća ispravka. Za sve tri stanice najveće vrijednosti reziduala ponovno zauzima nadmorska visina što znači da se uporabom Klobuchareva modela ispravke jednim dijelom može ukloniti pogreška izazvana ionosferskim kašnjenjem. Za ostale referentne koordinate također je postojala razlika pri korištenju modela ispravke. Ono što se javlja kod reziduala jesu stršće vrijednosti gdje se analizom može zaključiti da se stršće vrijednosti podudaraju s povećanjem položajnih odstupanja. Vrlo zanimljiva situacija kod reziduala je da se najveće vrijednosti reziduala javljaju u periodu između 13. i 15. ožujka. Taj se fenomen povećanih reziduala javlja na sve tri referentne stanice smještene na sjevernom polu u istom periodu promatranja.



Slika 61. Reziduali za period od 10. do 16. ožujka za stanicu SCOR

Izvor: Izradio autor obradom podataka u programu Rstudio

Na kraju, potrebno je komentirati i srednju kvadratnu pogrešku. Srednja kvadratna pogreška računa se posebno za modelirane i nemodelirane zapise. Na temelju toga, dobiva se 6 seta podataka – dva seta za svaku stanicu. Za stanicu SCOR i NYAL, rezultati RMS-a za geografsku širinu bili su mnogo veći u usporedbi s rezultatima RMS-a za stanicu THU. Za stanicu THU, za modelirane i nemodelirane zapise, rezultati nisu prelazili iznose veće od 5.5 metara. Rezultati o RMS za geografsku duljinu bili su mnogo manji po pitanju rezultata za stanicu NYAL, dok su za stanicu SCOR zadržavale vrijednosti veće od 10 metara. Što se tiče RMS-a za nadmorsku visinu uočljivo da su tu upravo najveće razlike između modeliranih i nemodeliranih zapisa. Kod modeliranih zapisa te su vrijednosti bile manje, a to se može vidjeti na svim referentnim stanicama.

Preostali statistički detaljni podatci o rezultatima nalaze se u prilogu ovoga rada.

6. ZAKLJUČAK

Stanje Sunčeve aktivnosti uvelike utječe na Zemljinu ionosferu, a time utječe jasno i na određivanje položaja korisnika GPS sustavom. Putem jasnih vremenskih pokazatelja koje se bilježe moguće je već s dosadašnjim opusom radova i znanja zaključiti da će se povećanjem Sunčeve aktivnosti položajna točnost korisnika naštetiti.

Ovim radom naglasak je stavljen na ionosfersko kašnjenje signala te model ispravke koji se zove Klobucharev model. Na postavljenu radnu hipotezu može se odgovoriti: odstupanja korisnika koji svoj položaj dobiva GPS sustavom uvijek bilježe odstupanja, koja su na kraju i neizbježna. Ako se upotrijebi Klobucharev model ispravke ta se pogreška može jednim dijelom ukloniti. Uz radnu hipotezu postavljene su i pomoćne hipoteze. Povećani transfer energije i materije sa Sunca uvelike utječe na odstupanje položaja korisnika. On je osnovni faktor prilikom istraživanja pogreške korisnika. Jačina Sunca u periodu od 10. do 24. ožujka bila je jača nego prijašnje godine te godine nakon čemu svjedoče brojni radovi te arhive svemirskog vremena koje bilježe aktivnost Sunca te ostale parametre kojima se ustanovljava jačina primjerice geomagnetske oluje i slično. Količina slobodnih elektrona poprima različite vrijednosti koje kao rezultat daju povećano ionosfersko kašnjenje jer su oni zapravo glavni akter i „krivac“ u proučavanju ove vrste pogreške. Na pitanja koja su se postavila također se može dati jasan odgovor. Odstupanja postaju veća kako se korisnik približava krajnjim točkama Zemlje, a to su sjeverni i južni pol. Odstupanja se statističkom obradom položajnih zapisa mogu jasno prikazati te na temelju toga izvesti jasnu analizu odstupanja. Za tri referentne stanice dolazi se do zaključka da su odstupanja radi svojega smještaja pri sjevernom polu vrlo izražena.

Ovaj rad je prikazom statističkih obrada kroz period od 10. do 24. ožujka ukazao na odstupanja koja su se pojavila tijekom, prije i poslije geomagnetske oluje koja je nastupila i odviše daje prostora za daljnje diskusije o odstupanjima položaja pri Zemljinim polovima. Ovi podatci dobiveni ovakvom vrstom kratkog istraživanja okvirni su pokazatelj mogućih trendova vezanih uz provedeno istraživanje.

7. LITERATURA

Aurora, Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, online: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/aurora>

B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, i 1. Collins (1992.): *Global Positioning System: Theory and Practice*, Graz, Austria

Bilitza D., et al (2022): *The International Reference Ionosphere Model: A review and Description of an Ionospheric Benchmark*, Advancing Earth and Space Science, Reviews of geophysics, online: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022RG000792>

Brčić D., Kos S., Pongračić B., Žic A. (2020): *On GPS L1 Positioning Error's Estimation in the Adriatic Region*, Pomorski zbornik 58 (2020), 169-184, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet Rijeka, p. 117, online: <https://hrcak.srce.hr/file/349692>

Brčić, D. (2015). *Model nespecifičnoga dnevnog hoda ionosferskog kašnjenja signala za satelitsko određivanje položaja*. Doktorska disertacija. Rijeka, Hrvatska: Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet

Brčić D., Filjar R., Kos S. (2013): *An assessment of Geomagnetic activity – Related technology failure risk based on patterns of Kp Index Dynamics in 2012*, Proceedings of 7th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference, The Royal Institute of Navigation, London, UK & University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Baška, Hrvatska, p. 69

Campbell H. W. (2003.) *Introduction to Geomagnetic Fields, Second Edition*, New York, USA: Cambridge University Press

CCDIS, NASA's Archive of Space Geodesy Data, National Aeronautics and Space Administration, online: https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/RINEX_Version_3.html

Differential Code Biases (DCB), Astronomical Institute, Bern, online: https://www.aiub.unibe.ch/research/code_analysis_center/differential_code_biases_dcb/index_eng.html

Differential Global Positioning System (DGPS) for Flight Testing, North Atlantic Treaty Organisation, Research And Technology Organisation, p.a-1, online: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA493532.pdf>

Earth's Magnetosphere, Space Weather Prediction Center, National Oceanic And Atmospheric Administration, online: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere>

Goodman, J.M. (2005) *Space Weather and Telecommunications*, New York: Springer Science and Business Media

GPS, *Essentials of Satellite Navigation, Compendium*, p. 13. online: https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/GPS-Compendium_Book_%28GPS-X-02007%29.pdf

GPS, Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics stranica, online: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>

Grewal S.M., Weill R.L., Andrews A.P. (2001.): *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*, A John Wiley & Sons, Inc. Publication

Hunsucker R., Hargreaves J.K. (2003.): *The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation*, Cambridge University Press

Jureković P. (2018.): *Komparativna parcijalna analiza raspšenja položajne točnosti GPS I GLONASS sustava u različitim stanjima svemirskog vremena*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka

Kaplan E.D. , Hegarty C. J. (2006.): *Understanding GPS: principles and applications.*— 2nd ed., Arctech House, London, Boston

Korona, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=33237>

Kos. S., Zorović D., Vranić D. (2010.): *Terestrička i elektronička navigacija*, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka

Krishna Seemala G.: *GPS_TEC analysis application*, Indian Institute of Geomagnetism (IIG), Navi Mumbai, India, online: <https://seemala.blogspot.com/>

Kumar, S. i Kumar, V. V. (2019). *Ionospheric response to the St. Patrick's Day space weather events in March 2012, 2013, and 2015 at southern low and middle latitudes*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, (124), p. 584, online: <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>

L, Kersley et.al.(2004); *Total electron content - A key parameter in propagation: Measurement and use in ionospheric imaging*. Annals of geophysics = Annali di geofisica. 47. 1067-1091. 10.4401/ag-3286., p. 1068, online: https://www.researchgate.net/publication/50301748_Total_electron_content_-_A_key_parameter_in_propagation_Measurement_and_use_in_ionospheric_imaging

Lang K., Zirin H.: *Sun*, Encyclopedia Britannica, 4 Feb. 2021, online: <https://www.britannica.com/place/Sun>

Lummerzheim, Dirk. (2009): *High-latitude ionosphere: Particle precipitation, in "Characterizing the ionosphere"*, online:

https://www.researchgate.net/publication/233408434_High-latitude_ionosphere_Particle_precipitation_in_Characterizing_the_ionosphere

Lummerzheim, Dirk. (2009): *High-latitude ionosphere: Particle precipitation, in "Characterizing the ionosphere"*, online: https://www.researchgate.net/publication/233408434_High-latitude_ionosphere_Particle_precipitation_in_Characterizing_the_ionosphere

M.Moldwin (2008.): *An Introduction to Space Weather*, Department of Earth and Space Sciences, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, Cambridge University Press,

Magnetosfera, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=38044>

N. Paar: *Nuklearni procesi u evoluciji supernove*, Matematičko-fizički list, LXII 1 (2011. – 2012.), online: <https://hrcak.srce.hr/file/354981>

National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Administration: *Types of Space Weather Storms*, online: <https://www.weather.gov/safety/space-storm-types#:~:text=%2BSolar%20Radiation%20Storms&text=Solar%20radiation%20storms%20occur%20when,bathed%20with%20high%20energy%20particles>

National Oceanic and Atmospheric Administration, Space Weather Prediction Center: *NOAA Space Weather Scales*, online: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

Pignatelli, A., et al. (2020): *On the Analytical Description of the Topside Ionosphere made by NeQuick: Modeling the Scale Height through COSMIC/FORMOSAT-3 Selected Data*, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, PP. 1-1. 10.1109/JSTARS.2020.2986683, online: https://www.researchgate.net/publication/340802871_On_the_Analytical_Description_of_the_Topside_Ionosphere_made_by_NeQuick_Modeling_the_Scale_Height_through_COSMIC/FORMOSAT-3_Selected_Data

Pongračić B. (2016): *Statistička analiza geomagnetskih i ionosferskih učinaka na točnost položaja određenog GPS sustavom u horizontalnoj ravnini*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka

Pongračić B., Kos S., Brčić D. (2017): *Spatial Assessment of GPS Ionospheric Delay Model During St. Patrick's Geomagnetic Storm*, 11th Annual Baska GNSS Conference, Baska, Krk, Croatia, University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka, The Royal Institute of Navigation, London, UK, online: <https://www.pfri.uniri.hr/web/hr/dokumenti/zbornici-gnss/2018-GNSS-11.pdf>

Prominencija, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50647>

Root-Mean-Square, Wolfram Math World, online: <https://mathworld.wolfram.com/Root-Mean-Square.html>

RTKLIB ver. 2.4.2 *Manual*, online: https://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf

SpaceWeatherLive.com., arhiva podataka, online: <https://www.spaceweatherlive.com/en/archive/2015/03/10/dayobs.html>

Teunissen P.J.G., Montenbruck O. (2017.): *Springer Handbook of Global Navigation Satellite System*, Springer International Publishing

Van Allenovi pojasi, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., online: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69650>

Zhang Y., et al (2003): *TEC Measurement By Single Dual-Frequency GPS Receiver*, Tokyo University of Mercantile Marine, Tokyo, Japan, online: https://www.researchgate.net/publication/268009595_TEC_Measurement_By_Single_Dual-frequency_GPS_Receiver

Žic A. (2018); *Strukturna analiza odstupanja položaja određenih satelitskim navigacijskim sustavom GPS uslijed učinaka svemirskog vremena*, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski Fakultet, Rijeka

Žic T.(2012.); *Eruptivni procesi u Sunčevoj koroni i njihovo širenje heliosferom*, Doktorska disertacija, Zagreb, Hrvatska, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Fizički odsjek

8. POPIS SLIKA

Slika 1. Područja Sjevernog pola (lijevo) i Južnog pola (desno)	1
Slika 2. Dijagram tijeka istraživanja	4
Slika 3. Položaj Sunca.....	10
Slika 4. Građa Sunca	11
Slika 5. Grafički prikaz kemijskog procesa fuzije	12
Slika 6. Sunce i njegova struktura.....	13
Slika 7. Granule (Sunce).....	14
Slika 8. Sunčeve pjege.....	16
Slika 9. Zemljina magnetosfera	18
Slika 10. Ionosfera i njeni pripadajući slojevi	20
Slika 11. Aurora Borealis	23
Slika 12. Ionosferski profil gustoće elektrona na IRI modelu ionosfere.....	28
Slika 13. Replikacija PRN koda.....	31
Slika 14. Odnos satelitskih segmenata	32
Slika 15. Satelitski segment GPS-a	33
Slika 16. Kontrolni segment GPS-a.....	34
Slika 17. Pojednostavljeni prikaz korisničke komponente GPS-a	35
Slika 18. Koordinatne osi WGS-84.....	37
Slika 19. Koncept raširenog spektra s izravnim nizom (DSSS).....	38
Slika 20. Prikaz GPS signala odašiljanih na pripadajućim frekvencijama.....	39
Slika 21. Struktura navigacijske GPS poruke.....	40
Slika 22. Geografski smještaj referentnih IGS stanica	44
Slika 23. Radno sučelje programa RTKLIB	46
Slika 24. Radno sučelje programa GPS_TEC.....	49
Slika 25. Grafički prikaz TEC vrijednosti dobivenih putem programa GPS_TEC na primjeru jedne referentne stanice (Ny-Alesund, NYAL, 19. ožujak 2015. godina)	50
Slika 26. Sunčeve pjege na dan 10. ožujak (lijevo) i 24. ožujak (desno)	51
Slika 27. Indikatori geomagnetske aktivnosti od 10. do 24. ožujka 2015.	52
Slika 28 Brzina Sunčevog vjetrova na dan 18. ožujak 2015.....	53
Slika 29. TEC jedinice za stanicu NYAL u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine	54

Slika 30. TEC jedinice za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine	54
Slika 31. TEC jedinice za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine	55
Slika 32. Nemodelirani zapisi u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 (THULE)	56
Slika 33 Modelirani zapisi u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 (THULE).....	57
Slika 34. Histogrami pogrešaka za odstupanja bez ionosferske ispravke za period od 10. do 24. ožujka 2015. godine (THULE)	58
Slika 35. Odstupanja modeliranih vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine (THULE).....	58
Slika 36. 3D vizualizacije nemodeliranih (lijevo) i modeliranih (desno) odstupanja za period od 15 dana (THULE).....	59
Slika 37. Reziduali za stanicu THU u periodu od 10. do 24. ožujka	59
Slika 38. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU bez modela ispravke (OFF).....	61
Slika 39. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU s modelom ispravke (ON).....	61
Slika 40 Nemodelirane vrijednosti odstupanja položaja za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)	63
Slika 41. Modelirane vrijednosti odstupanja položaja za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL).....	63
Slika 42. Histogrami učestalosti nemodeliranih odstupanja u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)	64
Slika 43. Histogrami učestalosti modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)	64
Slika 44. 3D vizualizacija odstupanja za nemodelirane (lijevo) i modelirane (desno) vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (NYAL)	65
Slika 45. Reziduali za stanicu NYAL u periodu od 10. do 24. ožujka.....	66
Slika 46. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL bez modela ispravke (OFF).....	67
Slika 47. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL s modelom ispravke (ON).....	67
Slika 48. Odstupanja za nemodelirane vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine (SCORE)	69
Slika 49. Odstupanja modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. godinu (SCORE).....	69
Slika 50. Histogram odstupanja nemodeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka (SCORE).....	70
Slika 51. Histogram odstupanja modeliranih vrijednosti za period od 10. do 24. ožujka 2015. godine (SCOR)	70

Slika 52. 3D vizualizacija odstupanja nemodeliranih (lijevo) i modeliranih (desno) vrijednosti u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. (SCOR)	71
Slika 53. Reziduali za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine	71
Slika 54. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR bez modela ispravke (OFF).....	72
Slika 55. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR s modelom ispravke (ON).....	73
Slika 56. Kategorizacija perioda promatranja.....	74
Slika 57. Iznos TEC jedinica za stanice Graz, Matera i Padova u istom periodu promatranja tijekom 2015. godine	86
Slika 58. Najveći iznos TEC jedinica - stanica SCOR na dan 23. ožujak 2015.....	87
Slika 59. Položajna odstupanja na primjeru stanice Matera u istom periodu promatranja tijekom 2015. godine	87
Slika 60. Nemodelirani zapisi odstupanja stanice THU u periodu od 10. do 24. ožujka 2015. godine.....	88
Slika 61. Reziduali za period od 10. do 16. ožujka za stanicu SCOR.....	89

9. POPIS TABLICA

Tablica 1. NOAA skala intenziteta svemirskog vremena.....	7
Tablica 2. Skala intenziteta geomagnetske oluje.....	8
Tablica 3. Skala intenziteta solarne radijacije	9
Tablica 4. Informacije o sustavima GNSS-a	29
Tablica 5. Pretvorba koordinata	36
Tablica 6. Korisnička razdioba točnosti	42
Tablica 7. Relevantni podatci o referentnim stanicama	44
Tablica 8. Reziduali položajnih zapisa za stanicu THU tijekom perioda od 10. do 24. ožujka 2015	60
Tablica 9. Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu THU	62
Tablica 10. Reziduali položajnih zapisa za stanicu NYAL tijekom perioda od 10. do 24. ožujka 2015. godine.....	66
Tablica 11.Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu NYAL	68
Tablica 12. Reziduali položajnih zapisa za stanicu SCOR u periodu od 10. do 24. ožujka 2015 godine	72
Tablica 13.Vrijednosti srednje kvadratne pogreške za stanicu SCOR.....	74
Tablica 14. Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 10. do 16. ožujka 2015. godine.....	75
Tablica 15. Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 10. do 16. ožujka	76
Tablica 16.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 10. do 16. ožujka	77
Tablica 17.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 10. do 16. ožujka	78
Tablica 18. Reziduali za period od 10. do 16. ožujka za sve tri referentne stanice.	78
Tablica 19.Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 17. do 19. ožujka 2015. godine.....	79
Tablica 20.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 17. do 19. ožujka	80
Tablica 21.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 17. do 19. ožujka	80
Tablica 22.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 17. do 19. ožujka	81
Tablica 23.Reziduali za period od 17. do 19. ožujka za sve tri referentne stanice..	81

Tablica 24.Srednje vrijednosti TEC jedinica u periodu od 19. do 24. ožujka 2015. godine.....	82
Tablica 25.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu NYAL za period od 20. do 24. ožujka	83
Tablica 26.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu SCOR za period od 20. do 24. ožujka	84
Tablica 27.Srednje vrijednosti odstupanja za stanicu THU za period od 20. do 24. ožujka	84
Tablica 28.Reziduali za period od 20. do 24. ožujka za sve tri referentne stanice..	85

10.PRILOG

Prilog 1: Programski kod provedenih istraživanja u programskom okruženju

PRORAČUN I ANALIZA ODSUPANJA POLOŽAJA

```
pos<-read.csv(file='A.pos', skip = 12, header =TRUE, sep=',')
c_names <- c("GPST", "lat", "lon", "H", "Q", "n_sat", "sd_n", "sd_e",
"sd_u",
                "sd_ne", "sd_eu", "sd_un", "age", "ratio")
colnames(pos)<- c_names
pos$GPST<-as.POSIXct(pos$GPST)

lat<-x
lon<-y
H<- z
d_lat<-(lat-pos$lat)
d_lon<-(lon-pos$lon)
d_h<-(H-pos$H)
cos_lat<-(cos(lat*pi/180))
lat_m<-(d_lat*60*1852)
lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)

summary(lat_m)
rows<-names(summary(lat_m))
summary_lat_m<-as.data.frame(matrix(summary(lat_m)))
summary_lat_m<-rbind(summary_lat_m,sd(lat_m))
summary_lon_m<-as.data.frame(matrix(summary(lon_m)))
summary_lon_m<-rbind(summary_lon_m,sd(lon_m))
summary_h<-as.data.frame(matrix(summary(d_h)))
summary_h<-rbind(summary_h,sd(d_h))
cols<-c('d_lat', 'd_lon', 'd_h')
stats<-cbind.data.frame(summary_lat_m,summary_lon_m, summary_h)
rownames(stats)<-c(rows, 'sd')
colnames(stats)<-cols
print(stats)
```

```

write.csv(file='stats.csv', stats)

plot(x = pos$GPST, y = lat_m, col="red",ylim=c(min(stats[1,]),
max(stats[6,])), type = 'l',
     main = 'Koordinatna odstupanja', xlab = 'Vrijeme (h)',
     ylab = 'Odstupanja (m)')
lines(x = pos$GPST, y = lon_m, col = 'blue')
lines(x = pos$GPST, y = d_h, col = 'darkgreen')
legend("bottomright", legend=c("lat_m", "lon_m", "d_h"),
      col=c("red", "blue", "darkgreen"), lty=c(1,1), cex=1)

hist(lat_m, col="red", xlab="Odstupanja geografske širine (m)",
ylab="Učestalost", breaks=20,
     main="Histogram pogreške geografske širine", ylim=c(0,390),
xlim=c(-6,-2))
hist(lon_m, col="blue", xlab="Odstupanja geografske duljine (m)",
ylab="Učestalost", breaks=20,
     main="Histogram pogreške geografske duljine", ylim=c(0,400),
xlim=c(-4,2))
hist(d_h, col="darkgreen", xlab="Odstupanja nadmorske visine (m)",
ylab="Učestalost", breaks=20,
     main="Histogram pogreške nadmorske visine", ylim=c(0,400),
xlim=c(-6,7))

library("scatterplot3d")
scatterplot3d(lon_m, lat_m, d_h, angle=235, color='red')

library("rgl")
plot3d(x=lon_m, y=lat_m, z=d_h, col='black', type = 's', radius = 0.9)

#PRORAČUN REZIDUALA

nyal_files_on <- Sys.glob("*NYAL*_ON.pos")
nyal_files_off<-Sys.glob("NYAL*_OFF.pos")
scor_files_on <- Sys.glob("SCOR*_ON.pos")
scor_files_off<-Sys.glob("SCOR*_OFF.pos")

```

```

thu_files_on <- Sys.glob("THU*_ON.pos")
thu_files_off<-Sys.glob("THU*_OFF.pos")

nyal_iono_on<-lapply(nyal_files_on, function(x) read.csv(x, skip=12))
nyal_iono_on<-lapply(nyal_iono_on, function(x) x[1:4])
nyal_iono_off<-lapply(nyal_files_off, function(x) read.csv(x, skip=12))
nyal_iono_off<-lapply(nyal_iono_off, function(x) x[1:4])

scor_iono_on<-lapply(scor_files_on, function(x) read.csv(x, skip=12))
scor_iono_on<-lapply(scor_iono_on, function(x) x[1:4])
scor_iono_off<-lapply(scor_files_off, function(x) read.csv(x, skip=12))
scor_iono_off<-lapply(scor_iono_off, function(x) x[1:4])

thu_iono_on<-lapply(thu_files_on, function(x) read.csv(x, skip=12))
thu_iono_on<-lapply(thu_iono_on, function(x) x[1:4])
thu_iono_off<-lapply(thu_files_off, function(x) read.csv(x, skip=12))
thu_iono_off<-lapply(thu_iono_off, function(x) x[1:4])

c_names<-c("Time", "lat", "lon", "H")
nyal_iono_on<-lapply(nyal_iono_on, setNames, c_names)
nyal_iono_off<-lapply(nyal_iono_off, setNames, c_names)
scor_iono_on<-lapply(scor_iono_on, setNames, c_names)
scor_iono_off<-lapply(scor_iono_off, setNames, c_names)
thu_iono_on<-lapply(thu_iono_on, setNames, c_names)
thu_iono_off<-lapply(thu_iono_off, setNames, c_names)

nyal_ref_pos<-c(78.930,11.865,79.00)
scor_ref_pos<-c(70.485,-21.950,128.5)
thu_ref_pos<-c(76.537,-68.825,36.200)

dev_mtr_nyal <- function(nyal_ref_pos,df) {
  d_lat<-(nyal_ref_pos[1]-df[,2])
  d_lon<-(nyal_ref_pos[2]-df[,3])
  d_h<-(nyal_ref_pos[3]-df[,4])
  cos_lat<-(cos(nyal_ref_pos[1]*pi/180))
  lat_m<-(d_lat*60*1852)

```

```

lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)
df$lat_m<-lat_m

df$lon_m<-lon_m
df$h_m<-d_h
return(df)
}

dev_mtr_scor <- function(scor_ref_pos,df) {
  d_lat<-(scor_ref_pos[1]-df[,2])
  d_lon<-(scor_ref_pos[2]-df[,3])
  d_h<-(scor_ref_pos[3]-df[,4])
  cos_lat<-(cos(scor_ref_pos[1]*pi/180))
  lat_m<-(d_lat*60*1852)
  lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)
  df$lat_m<-lat_m
  df$lon_m<-lon_m
  df$h_m<-d_h
  return(df)
}

dev_mtr_thu <- function(thu_ref_pos,df) {
  d_lat<-(thu_ref_pos[1]-df[,2])
  d_lon<-(thu_ref_pos[2]-df[,3])
  d_h<-(thu_ref_pos[3]-df[,4])
  cos_lat<-(cos(thu_ref_pos[1]*pi/180))
  lat_m<-(d_lat*60*1852)
  lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)
  df$lat_m<-lat_m
  df$lon_m<-lon_m
  df$h_m<-d_h
  return(df)
}

nyal_dev_on<-lapply(nyal_iono_on,function(x)
  dev_mtr_nyal(nyal_ref_pos,x))
nyal_dev_off<-lapply(nyal_iono_off,function(x)
  dev_mtr_nyal(nyal_ref_pos,x))

```

```

scor_dev_on<-lapply(scor_iono_on,function(x)
  dev_mtr_scor(scor_ref_pos,x))
scor_dev_off<-lapply(scor_iono_off,function(x)
  dev_mtr_scor(scor_ref_pos,x))
thu_dev_on<-lapply(thu_iono_on,function(x)
  dev_mtr_thu(thu_ref_pos,x))
thu_dev_off<-lapply(thu_iono_off,function(x)
  dev_mtr_thu(thu_ref_pos,x))

nyal_POS_ON<-do.call(rbind.data.frame,nyal_dev_on)
nyal_cols_on  =  c("Time","nyal_Lat",  "nyal_Lon",  "nyal_Nadmorska
visina",
                  "nyal_lat_m_on", "nyal_lon_m_on", "nyal_h_m_on")
colnames(nyal_POS_ON)<-nyal_cols_on
nyal_POS_ON$Time<-as.POSIXct(nyal_POS_ON$Time)
scor_POS_ON<-do.call(rbind.data.frame,scor_dev_on)
scor_cols_on  =  c("Time","scor_Lat",  "scor_Lon",  "scor_Nadmorska
visina",
                  "scor_lat_m_on", "scor_lon_m_on", "scor_h_m_on")
colnames(scor_POS_ON)<-scor_cols_on
scor_POS_ON$Time<-as.POSIXct(scor_POS_ON$Time)
thu_POS_ON<-do.call(rbind.data.frame,thu_dev_on)
thu_cols_on = c("Time","thu_Lat", "thu_Lon", "thu_Nadmorska visina",
               "thu_lat_m_on", "thu_lon_m_on", "thu_h_m_on")
colnames(thu_POS_ON)<-thu_cols_on
thu_POS_ON$Time<-as.POSIXct(thu_POS_ON$Time)

nyal_POS_OFF<-do.call(rbind.data.frame,nyal_dev_off)
nyal_cols_off = c("Time","nyal_Lat", "nyal_Lon", "nyal_Nadmorska
visina", "nyal_lat_m_off", "nyal_lon_m_off", "nyal_h_m_off")
colnames(nyal_POS_OFF)<-nyal_cols_off
nyal_POS_OFF$Time<-as.POSIXct(nyal_POS_OFF$Time)
scor_POS_OFF<-do.call(rbind.data.frame,scor_dev_off)
scor_cols_off = c("Time","scor_Lat", "scor_Lon", "scor_Nadmorska
visina", "scor_lat_m_off", "scor_lon_m_off", "scor_h_m_off")

```

```

colnames(scor_POS_OFF)<-scor_cols_off
scor_POS_OFF$Time<-as.POSIXct(scor_POS_OFF$Time)
thu_POS_OFF<-do.call(rbind.data.frame,thu_dev_off)
thu_cols_off = c("Time","thu_Lat", "thu_Lon", "thu_Nadmorska
visina", "thu_lat_m_off", "thu_lon_m_off", "thu_h_m_off")
colnames(thu_POS_OFF)<-thu_cols_off
thu_POS_OFF$Time<-as.POSIXct(thu_POS_OFF$Time)

nyal_stat_data_pos_on<-summary(nyal_POS_ON[,5:7])
print(nyal_stat_data_pos_on)
write.csv(nyal_stat_data_pos_on, "nyal_stat_data_pos_on.csv")
nyal_stat_data_pos_off<-summary(nyal_POS_OFF[,5:7])
print(nyal_stat_data_pos_off)
write.csv(nyal_stat_data_pos_off, "nyal_stat_data_pos_off.csv")
scor_stat_data_pos_on<-summary(scor_POS_ON[,5:7])
print(scor_stat_data_pos_on)
write.csv(scor_stat_data_pos_on, "scor_stat_data_pos_on.csv")
scor_stat_data_pos_off<-summary(scor_POS_OFF[,5:7])
print(scor_stat_data_pos_off)
write.csv(scor_stat_data_pos_off, "scor_stat_data_pos_off.csv")
thu_stat_data_pos_on<-summary(thu_POS_ON[,5:7])
print(thu_stat_data_pos_on)
write.csv(thu_stat_data_pos_on, "thu_stat_data_pos_on.csv")
thu_stat_data_pos_off<-summary(thu_POS_OFF[,5:7])
print(thu_stat_data_pos_off)
write.csv(thu_stat_data_pos_off, "thu_stat_data_pos_off.csv")

nyal_rez_lat<-nyal_POS_OFF$nyal_lat_m_off-nyal_POS_ON$nyal_lat_m_on
nyal_rez_lon <- nyal_POS_OFF$nyal_lon_m_off-nyal_POS_ON$nyal_lon_m_on
nyal_rez_h <- nyal_POS_OFF$nyal_h_m_off-nyal_POS_ON$nyal_h_m_on
nyal_rez_lat_stats<-summary(nyal_rez_lat)
print(summary(nyal_rez_lat))
nyal_rez_lon_stats<-summary(nyal_rez_lon)
print(summary(nyal_rez_lon))
nyal_rez_h_stats<-summary(nyal_rez_h)
print(summary(nyal_rez_h))

```

```

nyal_residuals_stats<-

as.data.frame(cbind(nyal_rez_h_stats,nyal_rez_lon_stats,nyal_rez_lat_stats)
)

write.csv(nyal_residuals_stats,"nyal_residuals_stats.csv")
nyal_rez<-as.data.frame(cbind(nyal_rez_lat, nyal_rez_lon, nyal_rez_h))
nyal_rez$Time<-nyal_POS_OFF$Time

library("ggplot2")

g<-ggplot(nyal_rez, aes(Time, color = Legend)) +

  geom_line(aes(y = nyal_rez_lat, color = "Reziduali geografske sirine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = nyal_rez_lon, color = "Reziduali geografske duljine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = nyal_rez_h, color = "Reziduali nadmorske visine
[m]"))+
  scale_color_manual(values=c('red','blue','green'))+
  ggtitle("IGS NYAL - vremenski period - Reziduali položajnih
odstupanja")+
  ylab("Reziduali položajnih odstupanja [m]")+xlab("Vrijeme (dani)")+
  theme_minimal()+
  theme(legend.position = "bottom")
g

scor_rez_lat<-scor_POS_OFF$scor_lat_m_off-scor_POS_ON$scor_lat_m_on
scor_rez_lon <- scor_POS_OFF$scor_lon_m_off-scor_POS_ON$scor_lon_m_on
scor_rez_h <- scor_POS_OFF$scor_h_m_off-scor_POS_ON$scor_h_m_on
scor_rez_lat_stats<-summary(scor_rez_lat)
print(summary(scor_rez_lat))
scor_rez_lon_stats<-summary(scor_rez_lon)
print(summary(scor_rez_lon))
scor_rez_h_stats<-summary(scor_rez_h)
print(summary(scor_rez_h))
scor_residuals_stats<-

```

```

as.data.frame(cbind(scor_rez_h_stats,scor_rez_lon_stats,scor_rez_lat_stats)
)
write.csv(scor_residuals_stats,"scor_residuals_stats.csv")
scor_rez<-as.data.frame(cbind(scor_rez_lat, scor_rez_lon, scor_rez_h))
scor_rez$Time<-scor_POS_OFF$Time

g<-ggplot(scor_rez, aes(Time, color = Legend)) +
  geom_line(aes(y = scor_rez_lat, color = "Reziduali geografske sirine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = scor_rez_lon, color = "Reziduali geografske duljine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = scor_rez_h, color = "Reziduali nadmorske visine
[m]"))+
  scale_color_manual(values=c("red", "blue", "green"))+
  ggtitle("IGS SCOR - vremenski period - Reziduali polozajnih
odstupanja")+
  ylab("Reziduali polozajnih odstupanja [m]")+xlab("Vrijeme (dani)")+
  theme_minimal()+
  theme(legend.position = "bottom")
g

thu_rez_lat<-thu_POS_OFF$thu_lat_m_off-thu_POS_ON$thu_lat_m_on
thu_rez_lon <- thu_POS_OFF$thu_lon_m_off-thu_POS_ON$thu_lon_m_on
thu_rez_h <- thu_POS_OFF$thu_h_m_off-thu_POS_ON$thu_h_m_on
thu_rez_lat_stats<-summary(thu_rez_lat)
print(summary(thu_rez_lat))
thu_rez_lon_stats<-summary(thu_rez_lon)
print(summary(thu_rez_lon))
thu_rez_h_stats<-summary(thu_rez_h)
print(summary(thu_rez_h))
thu_residuals_stats<-

as.data.frame(cbind(thu_rez_h_stats,thu_rez_lon_stats,thu_rez_lat_stats))
write.csv(thu_residuals_stats,"thu_residuals_stats.csv")
thu_rez<-as.data.frame(cbind(thu_rez_lat, thu_rez_lon, thu_rez_h))

```

```
thu_rez$Time<-thu_POS_OFF$Time
```

```
g<-ggplot(thu_rez, aes(Time, color = Legend)) +
  geom_line(aes(y = thu_rez_lat, color = "Reziduali geografske sirine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = thu_rez_lon, color = "Reziduali geografske duljine
[m]"))+
  geom_line(aes(y = thu_rez_h, color = "Reziduali nadmorske visine
[m]"))+
  scale_color_manual(values=c("red", "blue", "green"))+
  ggtitle("IGS THU - vremenski period - Reziduali položajnih
odstupanja")+
  ylab("Reziduali položajnih odstupanja [m]")+xlab("Vrijeme (dani)")+
  theme_minimal()+
  theme(legend.position = "bottom")
g
```

#SREDNJA KVADRATNA POGREŠKA (RMS)

```
RMS_list <- list()

for (i in 69:83) {

  file_name <- paste0("A_", i, "_ON.pos")
  pos <- read.csv(file = file_name, skip = 12, header = TRUE, sep = ",")
  colnames(pos) <- c("GPST", "lat", "lon", "H", "Q", "n_sat", "sd_n",
"sd_e", "sd_u", "sd_ne", "sd_eu", "sd_un", "age", "ratio")
  pos$GPST <- as.POSIXct(pos$GPST)

  H <- Z
  lat <- X
  lon <- Y
  d_lat<-(lat-pos$lat)
  d_lon<-(lon-pos$lon)
  d_h<-(H-pos$H)
```

```

cos_lat<-(cos(lat*pi/180))
lat_m<-(d_lat*60*1852)
lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)

Lat_RMS <- sqrt(mean(lat_m^2))
Lon_RMS <- sqrt(mean(lon_m^2))
H_RMS <- sqrt(mean(d_h^2))

  RMS_list[[i-68]] <- data.frame(day = i, Lat_RMS = Lat_RMS, Lon_RMS =
Lon_RMS, H_RMS = H_RMS)
}

RMS_df <- do.call(rbind, RMS_list)

library(dplyr)

RMS_df <- bind_rows(RMS_list)
write.csv(RMS_df, "RMS_resultsON.csv", row.names = FALSE)

RMS_list <- list()

for (i in 69:83) {

  file_name <- paste0("A_", i, "_OFF.pos")
  pos <- read.csv(file = file_name, skip = 12, header = TRUE, sep = ",")
  colnames(pos) <- c("GPST", "lat", "lon", "H", "Q", "n_sat", "sd_n",
"sd_e", "sd_u", "sd_ne", "sd_eu", "sd_un", "age", "ratio")
  pos$GPST <- as.POSIXct(pos$GPST)

  H <- Z
  lat <- X
  lon <- Y

```

```

d_lat<-(lat-pos$lat)
d_lon<-(lon-pos$lon)
d_h<-(H-pos$H)
cos_lat<-(cos(lat*pi/180))
lat_m<-(d_lat*60*1852)
lon_m<-(d_lon*60*1852*cos_lat)

Lat_RMS <- sqrt(mean(lat_m^2))
Lon_RMS <- sqrt(mean(lon_m^2))
H_RMS <- sqrt(mean(d_h^2))

RMS_list[[i-68]] <- data.frame(day = i, Lat_RMS = Lat_RMS, Lon_RMS =
Lon_RMS, H_RMS = H_RMS)
}

RMS_df <- do.call(rbind, RMS_list)
write.csv(RMS_df, file = "RMS_resultsOFF.csv", row.names = FALSE)

s
RMS_df <- read.csv("RMS_results.csv")
library(ggplot2)

ggplot(RMS_df, aes(x = day)) +
  geom_line(aes(y = Lat_RMS, color = "Latitude")) +
  geom_line(aes(y = Lon_RMS, color = "Longitude")) +
  geom_line(aes(y = H_RMS, color = "Height")) +
  xlab("Day of Year") +
  ylab("RMS Value [m]") +
  ggtitle("RMS Results for Latitude, Longitude, and Height") +
  scale_x_continuous(breaks = seq(69, 83, 1), limits = c(69, 83)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 40, 5), limits = c(0, 40)) +
  scale_color_manual(values = c("blue", "green", "red"), name =
"Reference Value",
                      labels = c("Height", "Latitude", "Longitude"))

```

```

library(ggplot2)

RMS_df <- read.csv("RMS_results.csv")

Lat_plot <- ggplot(RMS_df, aes(x = day, y = Lat_RMS)) +
  geom_line(color = "blue") +
  xlab("Day of Year") +
  ylab("RMS Value [m]") +
  ggtitle("RMS Results for Latitude") +
  scale_x_continuous(breaks = seq(69, 83, 1), limits = c(69, 83)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 40, 5), limits = c(0, 40))

Lon_plot <- ggplot(RMS_df, aes(x = day, y = Lon_RMS)) +
  geom_line(color = "green") +
  xlab("Day of Year") +
  ylab("RMS Value [m]") +
  ggtitle("RMS Results for Longitude") +
  scale_x_continuous(breaks = seq(69, 83, 1), limits = c(69, 83)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 40, 5), limits = c(0, 40))

H_plot <- ggplot(RMS_df, aes(x = day, y = H_RMS)) +
  geom_line(color = "red") +
  xlab("Day of Year") +
  ylab("RMS Value [m]") +
  ggtitle("RMS Results for Height") +
  scale_x_continuous(breaks = seq(69, 83, 1), limits = c(69, 83)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(0, 40, 5), limits = c(0, 40))

grid.arrange(Lat_plot, Lon_plot, H_plot, ncol = 3)

```

Prilog 2: Odstupanja položaja prilikom uključenog te isključenog modela ispravke

NYAL (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				NYAL (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA	DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA
69				69			
Min.	43,598154	-4,402160	-11,807400	Min.	43,44881	-4,05684	-16,48460
1st Qu.	45,892838	-2,876160	-6,437800	1st Qu.	45,81911	-2,61513	-10,42405
Median	46,434937	-1,966129	-4,602400	Median	46,37682	-1,82751	-8,55730
Mean	46,370890	-2,052151	-4,541533	Mean	46,30682	-1,83369	-8,47799
3rd Qu.	46,957201	-1,320759	-2,768450	3rd Qu.	46,93475	-1,17701	-6,47090
Max.	49,035145	0,256757	9,075700	Max.	48,68778	0,88649	4,39510
sd	0,875835	1,012009	2,537707	sd	0,93259	0,98829	2,90450
70				70			
Min.	43,442475	-3,855128	-18,414900	Min.	43,41881	-3,94350	-20,18870
1st Qu.	45,992707	-2,501255	-7,402750	1st Qu.	45,81591	-2,19459	-11,65758
Median	46,646231	-1,924001	-4,857150	Median	46,62701	-1,68480	-8,68905
Mean	46,553379	-1,932965	-4,881334	Mean	46,49019	-1,67082	-8,88470
3rd Qu.	47,237584	-1,328376	-2,564450	3rd Qu.	47,20366	-1,10247	-6,14205
Max.	50,134677	-0,052657	8,163300	Max.	50,09656	0,81693	3,70490
sd	1,187729	0,788918	3,868760	sd	1,23633	0,81529	4,01257
71				71			
Min.	42,469731	-3,978407	-14,425800	Min.	42,64008	-4,03708	-16,08870
1st Qu.	46,137330	-2,976567	-5,163075	1st Qu.	46,05285	-2,79845	-9,10578
Median	46,567836	-2,451500	-3,542350	Median	46,51189	-2,20286	-7,40420
Mean	46,432079	-2,396721	-3,564264	Mean	46,38751	-2,14783	-7,48876
3rd Qu.	46,961340	-1,908148	-2,152300	3rd Qu.	46,96015	-1,43740	-6,05450
Max.	48,912024	0,261557	6,690300	Max.	49,07915	0,64403	2,80520
sd	0,953268	0,758408	2,587461	sd	0,96250	0,90257	2,53271
72				72			
Min.	43,236792	-4,915610	-16,255900	Min.	43,30313	-4,29192	-21,15270
1st Qu.	45,629067	-3,052667	-5,056025	1st Qu.	45,55617	-2,55000	-10,24228
Median	46,159748	-2,262175	-3,736000	Median	46,11241	-1,76083	-8,41215
Mean	46,087439	-2,158581	-3,747871	Mean	46,00530	-1,74654	-8,69933
3rd Qu.	46,622396	-1,260922	-2,175725	3rd Qu.	46,58009	-0,93489	-6,79358
Max.	48,406094	0,466873	5,789500	Max.	48,41543	0,75766	1,57580
sd	0,955228	1,139574	2,594629	sd	1,00886	1,10489	2,99100
73				73			
Min.	44,702354	-4,519358	-12,743400	Min.	44,58801	-4,59668	-17,86610
1st Qu.	46,016292	-3,199912	-5,238200	1st Qu.	45,90795	-2,31459	-10,22745
Median	46,492830	-2,201880	-3,612000	Median	46,37521	-1,73822	-8,42015
Mean	46,598956	-2,218212	-3,702148	Mean	46,51540	-1,78939	-8,65630
3rd Qu.	47,208860	-1,337694	-2,102700	3rd Qu.	47,13166	-1,02365	-6,93678
Max.	48,983585	0,265633	4,651300	Max.	49,05248	0,75717	-1,22300

sd	0,770586	1,109582	2,483089	sd	0,82186	0,99119	2,43402
74				74			
Min.	44,293765	-4,999993	-10,352500	Min.	44,11108	-4,57005	-14,02880
1st Qu.	45,875698	-3,185510	-5,797175	1st Qu.	45,68399	-2,34046	-9,84960
Median	46,459661	-2,047781	-4,527350	Median	46,40132	-1,88739	-8,21005
Mean	46,424679	-2,118788	-4,355980	Mean	46,33277	-1,72875	-8,34050
3rd Qu.	46,988814	-1,420697	-3,046400	3rd Qu.	46,93020	-1,10594	-6,93573
Max.	48,311420	1,041855	3,052800	Max.	48,26564	1,06908	-1,23630
sd	0,748734	1,227067	2,215347	sd	0,80855	1,07784	2,19926
75				75			
Min.	43,875399	-4,020204	-12,531200	Min.	43,56248	-3,89821	-17,60870
1st Qu.	45,188670	-2,588690	-5,919775	1st Qu.	45,08905	-2,25248	-9,88063
Median	45,761272	-2,143804	-4,129600	Median	45,64126	-1,64111	-7,99130
Mean	45,857339	-2,028559	-3,961760	Mean	45,78168	-1,64195	-7,87399
3rd Qu.	46,532972	-1,444353	-2,601700	3rd Qu.	46,49650	-1,12799	-6,33258
Max.	47,970171	0,546115	7,306500	Max.	48,05351	0,70524	2,54100
sd	0,888322	0,839473	3,131068	sd	0,94217	0,88527	2,98077
76				76			
Min.	41,997360	-4,745242	-10,398600	Min.	41,76267	-4,52281	-15,89830
1st Qu.	45,768328	-3,074494	-5,678625	1st Qu.	45,67485	-2,62106	-9,48350
Median	46,309593	-2,366274	-3,262350	Median	46,24787	-1,75010	-7,30585
Mean	46,223567	-2,216755	-3,568095	Mean	46,13649	-1,82246	-7,48223
3rd Qu.	46,840803	-1,308661	-1,701550	3rd Qu.	46,79330	-1,11147	-5,51753
Max.	49,212048	0,381529	5,491700	Max.	49,16838	1,18152	0,96230
sd	1,080277	1,047454	2,722628	sd	1,13521	1,04553	2,77749
77				77			
Min.	42,815869	-4,308282	-11,193000	Min.	42,68853	-3,79225	-14,61940
1st Qu.	45,359823	-2,712343	-3,807050	1st Qu.	45,26370	-2,40676	-7,50678
Median	45,807331	-2,222949	-2,363650	Median	45,73166	-1,71015	-6,25150
Mean	45,703220	-2,206608	-2,264092	Mean	45,62093	-1,80681	-6,20526
3rd Qu.	46,216586	-1,665558	-0,762525	3rd Qu.	46,12858	-1,29250	-4,94245
Max.	47,723929	0,061448	5,520600	Max.	47,67115	0,25347	0,69050
sd	0,763564	0,813311	2,340581	sd	0,76026	0,73221	2,06549
78				78			
Min.	43,685939	-3,941517	-12,367500	Min.	43,38436	-3,41486	-18,82460
1st Qu.	45,855613	-2,845095	-4,191150	1st Qu.	45,79244	-2,31893	-8,27355
Median	46,235310	-2,247080	-2,666050	Median	46,16219	-1,88534	-6,68870
Mean	46,333503	-2,153049	-2,816518	Mean	46,25709	-1,74449	-6,76538
3rd Qu.	46,833885	-1,483910	-1,449825	3rd Qu.	46,76613	-1,17614	-5,30975
Max.	48,619334	0,260405	7,087400	Max.	48,76123	0,47394	2,76580
sd	0,689526	0,916096	2,449671	sd	0,72351	0,76462	2,42781
79				79			
Min.	42,706416	-4,558232	-10,931800	Min.	42,64997	-3,42054	-15,91220
1st Qu.	45,724852	-2,747936	-5,094150	1st Qu.	45,57390	-2,42827	-8,84453
Median	46,174416	-2,246739	-3,655000	Median	46,13236	-1,90131	-7,16520
Mean	46,093520	-2,175592	-3,350085	Mean	46,00924	-1,77715	-7,31154
3rd Qu.	46,624952	-1,418691	-1,676625	3rd Qu.	46,57209	-1,22443	-5,47408
Max.	48,159519	-0,185431	5,442100	Max.	48,18085	0,76357	0,75140

sd	0,840004	0,851372	2,649236	sd	0,86937	0,80223	2,65013
80				80			
Min.	42,377279	-5,686819	-12,778600	Min.	42,22282	-5,39970	-16,57730
1st Qu.	45,632984	-3,070882	-5,053050	1st Qu.	45,60456	-2,56822	-8,75970
Median	46,168860	-2,406076	-3,402500	Median	46,11180	-2,03409	-6,93170
Mean	46,003788	-2,335382	-3,123308	Mean	45,92758	-1,93437	-7,05213
3rd Qu.	46,649676	-1,612683	-1,377975	3rd Qu.	46,59237	-1,27595	-5,17603
Max.	48,085402	0,345280	5,404600	Max.	48,10863	0,72764	2,27480
sd	1,064771	1,103556	3,070273	sd	1,10389	1,05713	3,05568
81				81			
Min.	43,848174	-5,744106	-12,429700	Min.	43,73372	-5,31139	-16,02490
1st Qu.	46,001402	-2,960794	-5,296300	1st Qu.	45,89281	-2,48377	-9,47925
Median	46,614840	-2,136187	-3,732500	Median	46,53861	-1,74776	-7,48980
Mean	46,499448	-2,198245	-3,752695	Mean	46,41985	-1,80532	-7,67767
3rd Qu.	47,064459	-1,519125	-1,955325	3rd Qu.	47,00534	-1,23394	-5,78005
Max.	48,944360	0,153811	3,148600	Max.	48,72256	1,10057	-0,56850
sd	0,866102	0,995886	2,603690	sd	0,88770	0,95307	2,75372
82				82			
Min.	42,885875	-5,335096	-19,557100	Min.	42,86054	-4,09652	-23,99570
1st Qu.	45,917312	-3,079337	-6,099700	1st Qu.	45,79097	-2,56279	-10,32490
Median	46,423269	-2,237074	-4,263500	Median	46,37199	-2,04936	-8,08685
Mean	46,288195	-2,327524	-4,552648	Mean	46,17342	-1,92512	-8,52009
3rd Qu.	46,797882	-1,471423	-2,604550	3rd Qu.	46,74741	-1,24292	-6,18550
Max.	48,549106	-0,210394	5,611800	Max.	48,41498	0,49508	0,53700
sd	0,835086	1,059729	3,054810	sd	0,91820	0,93579	3,60786
83				83			
Min.	44,379550	-5,026791	-26,325700	Min.	43,97563	-4,07051	-30,81960
1st Qu.	45,760216	-2,646292	-5,855575	1st Qu.	45,65346	-2,25553	-10,11570
Median	46,257367	-2,022263	-4,141100	Median	46,20370	-1,68110	-8,04615
Mean	46,354160	-2,123153	-4,397644	Mean	46,27707	-1,71716	-8,40132
3rd Qu.	46,886195	-1,486027	-2,744850	3rd Qu.	46,85572	-1,19083	-6,53275
Max.	48,972473	-0,049563	4,322300	Max.	48,96558	0,37154	1,33170
sd	0,800265	0,934326	3,152601	sd	0,82789	0,76168	3,31004
SCOR (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				SCOR (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA	DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA
69				69			
Min.	-43,2435703	9,9488759	- 21,9077000	Min.	-43,844952	9,492448	-26,498800
1st Qu.	-37,4498013	11,7021852	- 1,3941750	1st Qu.	-37,995067	11,914438	-5,507275
Median	-36,8686159	12,4794417	0,3192000	Median	-37,210088	12,567045	-3,122650
Mean	-36,8081460	12,3686327	0,3197940	Mean	-37,139540	12,481938	-3,293127
3rd Qu.	-36,3046541	13,0533918	1,9031750	3rd Qu.	-36,435915	13,137311	-1,347150
Max.	-22,6928153	14,6529871	37,5236000	Max.	-21,658955	14,895529	37,589900
sd	1,1461977	0,8293512	3,0717359	sd	1,352193	0,838640	3,571389
70				70			

Min.	-44,3736607	9,8948662	- 23,1501000	Min.	-45,384519	9,834695	-29,282500
1st Qu.	-37,7352130	11,8444200	- 1,8984000	1st Qu.	-38,050072	12,007099	-5,710275
Median	-37,0456301	12,3896298	- 0,0647500	Median	-37,245757	12,522130	-3,632200
Mean	-37,0108691	12,3505099	- 0,3323272	Mean	-37,330054	12,483639	-3,972357
3rd Qu.	-36,3318230	12,8664553	1,8100250	3rd Qu.	-36,484141	12,986000	-1,365075
Max.	-27,2330674	14,2675697	32,1316000	Max.	-26,448005	14,878454	31,480500
sd	1,1776789	0,7849550	3,9990373	sd	1,302907	0,844521	4,591789
71				71			
Min.	-42,1315925	10,0724113	- 20,9818000	Min.	-43,259238	9,784323	-27,428600
1st Qu.	-37,7212119	11,3728841	- 1,3283750	1st Qu.	-38,033570	11,503120	-5,285350
Median	-37,0767992	11,9685958	0,2339500	Median	-37,413826	12,169527	-3,537700
Mean	-36,9608502	12,1320485	0,5667497	Mean	-37,302648	12,268918	-3,052669
3rd Qu.	-36,4271362	12,8424201	1,6734500	3rd Qu.	-36,681712	12,940148	-1,558175
Max.	-25,2988015	14,7005750	33,0977000	Max.	-24,697865	15,260568	31,031600
sd	1,1951803	0,9616612	3,4045361	sd	1,282653	1,011231	3,804800
72				72			
Min.	-42,0764770	9,3249994	- 16,5226000	Min.	-43,130228	8,949604	-22,451600
1st Qu.	-37,9977618	11,3528857	- 1,5464250	1st Qu.	-38,655426	11,540008	-6,794400
Median	-37,2883162	12,4999506	0,1528500	Median	-37,867529	12,657766	-4,060500
Mean	-37,1969799	12,3769215	0,3618352	Mean	-37,805039	12,587586	-4,277950
3rd Qu.	-36,5734534	13,3730046	2,0384500	3rd Qu.	-36,899841	13,636863	-1,776075
Max.	-26,7172483	14,9356562	26,8759000	Max.	-27,253291	15,161457	23,382000
sd	1,2112531	1,2060938	3,3712654	sd	1,460385	1,258710	4,311008
73				73			
Min.	-42,7738661	9,2151983	- 23,5692000	Min.	-45,083495	10,013168	-33,104600
1st Qu.	-37,4066590	11,4827408	- 1,0295750	1st Qu.	-38,383765	11,967974	-6,290775
Median	-36,9596788	12,3879780	0,3671500	Median	-37,452996	12,600156	-4,012550
Mean	-36,8912715	12,2513343	0,4373745	Mean	-37,492837	12,472563	-4,172920
3rd Qu.	-36,4258305	12,9843392	1,8055250	3rd Qu.	-36,675323	13,071729	-2,105425
Max.	-27,5688720	14,7356534	21,2303000	Max.	-28,315487	14,756069	18,560300
sd	1,0353867	0,9525653	2,8986675	sd	1,295118	0,837569	3,533703
74				74			
Min.	-45,2316182	8,7784439	- 29,2076000	Min.	-46,606062	8,971951	-35,677600
1st Qu.	-37,4247993	11,5732488	- 1,3961500	1st Qu.	-38,154052	11,824338	-5,435075
Median	-36,9140084	12,4670622	- 0,0064500	Median	-37,404492	12,616470	-3,660000
Mean	-36,8917015	12,4540411	0,2254171	Mean	-37,398510	12,656468	-3,529145
3rd Qu.	-36,3645478	13,3310961	1,5732250	3rd Qu.	-36,695435	13,577564	-1,865075
Max.	-24,9815539	15,5448703	47,3845000	Max.	-25,617827	15,320925	43,602600
sd	1,0804571	1,2080428	3,1957330	sd	1,262474	1,139225	3,556095
75				75			
Min.	-42,7570870	9,6700672	- 20,7806000	Min.	-43,621712	9,901919	-25,363000
1st Qu.	-37,3878241	11,8520017	- 1,0421500	1st Qu.	-37,967232	11,978024	-4,999425
Median	-36,7606628	12,4426558	0,2972000	Median	-37,253591	12,655168	-3,400300
Mean	-36,7551660	12,4736348	0,6144109	Mean	-37,277247	12,677047	-3,082123
3rd Qu.	-36,0563009	13,0986040	1,8724250	3rd Qu.	-36,611456	13,438419	-1,577200
Max.	-29,8582774	15,4711870	16,7909000	Max.	-29,723822	15,354296	14,091600
sd	1,1455171	0,8872153	3,0023814	sd	1,139933	0,924867	3,227541
76				76			

Min.	-44,2036471	8,6715011	- 29,4090000	Min.	-45,046715	9,168835	-34,164900
1st Qu.	-37,6018968	11,3343349	- 0,8732000	1st Qu.	-38,168553	11,728847	-4,869800
Median	-36,9227314	12,4252094	0,7765000	Median	-37,359044	12,575434	-2,954050
Mean	-36,7865632	12,3435256	0,9870117	Mean	-37,283471	12,578442	-2,733050
3rd Qu.	-36,1627817	13,3328500	2,8338000	3rd Qu.	-36,575787	13,391388	-0,789125
Max.	-26,0629738	15,9759453	26,3757000	Max.	-25,698834	16,843218	24,709700
sd	1,4018959	1,3173267	3,5472498	sd	1,473416	1,258709	3,814722
77				77			
Min.	-46,5600578	9,9846596	- 27,0008000	Min.	-48,112404	10,440754	-33,561600
1st Qu.	-37,5710610	11,8126266	0,8964000	1st Qu.	-37,962759	12,122560	-2,793775
Median	-36,8125003	12,5721490	2,2444000	Median	-37,342876	12,744590	-1,487300
Mean	-36,8652153	12,4920175	2,3842215	Mean	-37,371906	12,715165	-1,321750
3rd Qu.	-36,1108609	13,1680649	3,7701500	3rd Qu.	-36,794610	13,260447	-0,027275
Max.	-26,4652282	14,8190622	30,7298000	Max.	-26,809700	15,388558	28,002600
sd	1,1855981	0,8350880	2,8961736	sd	1,029469	0,775575	2,816796
78				78			
Min.	-49,7111988	9,7281230	- 36,4585000	Min.	-51,061751	9,899692	-42,566900
1st Qu.	-37,4370503	11,9403103	- 0,0144500	1st Qu.	-37,977149	12,158966	-4,028850
Median	-36,8397247	12,5841388	1,3616000	Median	-37,343321	12,715024	-2,591300
Mean	-36,8678968	12,5321913	1,2933190	Mean	-37,380989	12,752255	-2,484921
3rd Qu.	-36,2296204	13,1522610	2,7362500	3rd Qu.	-36,715326	13,370230	-0,887650
Max.	-28,1489184	16,1555321	24,4121000	Max.	-28,504391	16,791584	21,512600
sd	1,1076591	0,8263690	2,9108911	sd	1,160650	0,820881	3,137185
79				79			
Min.	-44,2345385	9,5319065	- 33,0746000	Min.	-45,004378	9,506219	-37,458000
1st Qu.	-37,1011067	11,8825515	0,1198750	1st Qu.	-37,487527	12,130782	-3,795225
Median	-36,4083569	12,4932875	1,4956000	Median	-36,918231	12,606392	-2,325800
Mean	-36,4285766	12,4272607	1,6061201	Mean	-36,910319	12,646861	-2,115399
3rd Qu.	-35,7324973	12,9705677	3,1288750	3rd Qu.	-36,318627	13,169039	-0,544800
Max.	-28,4733888	15,2693282	23,9301000	Max.	-29,012432	15,693981	20,308200
sd	1,1864390	0,7448975	2,8346725	sd	1,100337	0,751065	3,054759
80				80			
Min.	-43,2710170	9,2895497	- 23,0808000	Min.	-44,845810	9,445305	-29,809700
1st Qu.	-37,2232554	11,6975267	- 0,0713500	1st Qu.	-37,665846	11,859686	-3,916150
Median	-36,4678061	12,3392208	1,5401000	Median	-36,970846	12,590041	-1,960700
Mean	-36,4445604	12,3277860	1,6942464	Mean	-36,935756	12,551548	-2,021856
3rd Qu.	-35,7035227	13,1090347	3,3174500	3rd Qu.	-36,284347	13,301187	-0,473700
Max.	-26,4274474	15,9484022	23,8837000	Max.	-26,633464	16,535196	22,168200
sd	1,2501380	1,0265897	2,7786487	sd	1,168352	1,014347	2,972401
81				81			
Min.	-40,4296786	8,8596254	- 11,0377000	Min.	-41,365198	8,937318	-17,516900
1st Qu.	-37,2765097	11,8165335	- 0,8799250	1st Qu.	-37,917311	11,991907	-4,859325
Median	-36,7197151	12,5014911	0,6456000	Median	-37,153805	12,590895	-2,870150
Mean	-36,6905680	12,3098902	0,7397745	Mean	-37,186416	12,514970	-3,012417
3rd Qu.	-36,1418356	12,9993543	2,5001750	3rd Qu.	-36,405440	13,163137	-0,990250
Max.	-31,3008372	14,4334963	19,3819000	Max.	-31,031038	14,939554	19,665800
sd	0,9283587	0,9638918	2,7472734	sd	1,173007	0,929737	3,316173
82				82			

Min.	-40,1405443	9,1520571	- 10,8483000	Min.	-40,661364	9,400205	-16,075700
1st Qu.	-37,2011981	11,2830350	- 1,2639750	1st Qu.	-37,648901	11,597089	-5,279300
Median	-36,5857044	12,4375703	0,6431000	Median	-36,976180	12,551269	-2,967100
Mean	-36,4763663	12,1743687	0,5072061	Mean	-36,988217	12,406248	-3,233066
3rd Qu.	-35,8821481	13,0606859	2,1473250	3rd Qu.	-36,336629	13,194337	-1,032675
Max.	-28,0441322	15,0297184	18,9169000	Max.	-28,569952	14,981722	15,570000
sd	1,1489848	1,1452288	2,8136192	sd	1,206789	1,066524	3,432438
83				83			
Min.	-43,3704694	8,5691240	- 23,7405000	Min.	-44,849365	9,035500	-30,175400
1st Qu.	-37,3948802	11,5380868	- 0,9107000	1st Qu.	-37,864279	11,862599	-4,736475
Median	-36,6099286	12,6318937	0,7776500	Median	-37,010183	12,779390	-2,927350
Mean	-36,5863574	12,3712407	0,4256822	Mean	-37,090516	12,586653	-3,340488
3rd Qu.	-35,8734530	13,2439382	2,3140500	3rd Qu.	-36,371854	13,437473	-1,135050
Max.	-29,2638965	15,1137581	22,9964000	Max.	-29,504138	15,174635	20,668600
sd	1,2038566	1,1521867	3,5515716	sd	1,197118	1,102212	4,135508
THU (UKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)				THU (ISKLJUČEN IONOSFERSKI MODEL)			
DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA	DOY	G. ŠIRINA	G. DULJINA	NAD. VISINA
69				69			
Min.	-7,861629	-1,114664	-8,515600	Min.	-8,064201	-1,130626	-13,176000
1st Qu.	-6,070097	0,139973	-1,353050	1st Qu.	-6,292531	0,115396	-4,854925
Median	-4,992899	0,596707	0,517100	Median	-5,089685	0,595400	-2,789200
Mean	-5,027398	0,645696	0,477573	Mean	-5,145553	0,626237	-2,894315
3rd Qu.	-4,092911	1,075567	2,324300	3rd Qu.	-4,152193	1,069325	-0,924000
Max.	-1,723249	2,364915	9,284900	Max.	-1,676690	2,377566	6,431400
sd	1,276922	0,638265	2,876295	sd	1,358973	0,653470	3,045163
70				70			
Min.	-10,159146	-2,993961	-17,261900	Min.	-10,039248	-2,932570	-20,222400
1st Qu.	-5,596114	-0,154306	-2,812875	1st Qu.	-5,690733	-0,192937	-6,490225
Median	-4,932783	0,574588	-0,197450	Median	-5,023735	0,587898	-3,355550
Mean	-4,966090	0,595393	-0,021635	Mean	-5,037594	0,581748	-3,383576
3rd Qu.	-4,251840	1,447457	2,711200	3rd Qu.	-4,295510	1,414039	-0,496850
Max.	-1,430337	3,485064	15,273500	Max.	-1,461450	3,393869	12,300100
sd	1,093488	1,184159	4,484021	sd	1,111683	1,191968	4,667613
71				71			
Min.	-9,562209	-1,235557	-15,635100	Min.	-9,949907	-1,194294	-20,098000
1st Qu.	-6,534856	0,221117	-1,565725	1st Qu.	-6,685201	0,196721	-5,001500
Median	-5,506385	0,744222	-0,374600	Median	-5,587225	0,751388	-3,689600
Mean	-5,517036	0,801691	-0,058335	Mean	-5,605353	0,799540	-3,351195
3rd Qu.	-4,463329	1,368972	1,510025	3rd Qu.	-4,472858	1,385911	-1,701800
Max.	-2,452196	7,535531	9,154700	Max.	-2,432861	7,947521	5,956000
sd	1,240658	0,889064	3,144898	sd	1,301684	0,895810	3,232796
72				72			
Min.	-8,118761	-1,648764	-10,203300	Min.	-8,475234	-2,218565	-15,758400
1st Qu.	-6,018843	0,643404	-1,315125	1st Qu.	-6,500714	0,599094	-5,443200

Median	-5,052960	1,260147	0,717750	Median	-5,127243	1,147959	-3,295700
Mean	-5,117093	1,205809	0,672090	Mean	-5,327753	1,192618	-3,493948
3rd Qu.	-4,190113	1,800566	3,406725	3rd Qu.	-4,264897	1,858885	-1,148375
Max.	-2,672436	3,786819	9,872900	Max.	-2,673769	4,195239	7,183500
sd	1,153952	1,020217	3,390414	sd	1,274351	1,063195	3,777061
73				73			
Min.	-7,957192	-1,180297	-6,092500	Min.	-8,237214	-1,295241	-10,587700
1st Qu.	-5,699678	0,250376	-0,543000	1st Qu.	-5,965477	0,276609	-5,173200
Median	-5,179970	0,921720	0,754700	Median	-5,301757	1,006162	-3,309000
Mean	-5,141149	0,873439	0,916667	Mean	-5,350343	0,865647	-3,223704
3rd Qu.	-4,608258	1,451138	2,549900	3rd Qu.	-4,730712	1,444696	-1,613700
Max.	-2,374412	2,937666	6,627900	Max.	-2,351077	2,868100	3,995100
sd	0,995943	0,755045	2,353052	sd	1,144342	0,797496	2,809948
74				74			
Min.	-7,384368	-0,720239	-10,657700	Min.	-7,413704	-0,754363	-13,760300
1st Qu.	-6,085487	0,424460	-1,977525	1st Qu.	-6,141964	0,424298	-5,201175
Median	-5,054904	0,928783	-0,449750	Median	-5,103297	0,953062	-3,603150
Mean	-4,859190	0,889498	-0,456061	Mean	-4,896832	0,895288	-3,634784
3rd Qu.	-3,699768	1,349330	1,104700	3rd Qu.	-3,730354	1,374651	-2,002750
Max.	-1,665911	2,848697	5,981700	Max.	-1,891818	2,824378	2,773000
sd	1,403443	0,611808	2,379782	sd	1,416418	0,631493	2,409840
75				75			
Min.	-9,190735	-1,173338	-18,005900	Min.	-9,211959	-1,214499	-20,989500
1st Qu.	-5,926196	0,536454	-2,595675	1st Qu.	-5,982895	0,549454	-5,881500
Median	-5,501829	1,273096	-0,736450	Median	-5,517386	1,283211	-3,937700
Mean	-5,350436	1,087359	-0,515568	Mean	-5,390023	1,093996	-3,627809
3rd Qu.	-4,850055	1,589177	1,540900	3rd Qu.	-4,887141	1,625318	-1,586325
Max.	-2,241846	3,584873	8,413100	Max.	-2,077388	3,727446	6,114100
sd	0,938735	0,823105	3,374961	sd	0,953004	0,850677	3,416536
76				76			
Min.	-8,253771	-2,465863	-7,469200	Min.	-8,281107	-2,522856	-10,634000
1st Qu.	-5,848857	0,252588	-1,437450	1st Qu.	-5,869636	0,273078	-4,620025
Median	-5,316925	0,705752	0,290400	Median	-5,328371	0,744157	-2,817950
Mean	-5,268566	0,687678	0,482217	Mean	-5,286100	0,711433	-2,674733
3rd Qu.	-4,611480	1,163074	2,132525	3rd Qu.	-4,613036	1,186494	-1,075400
Max.	-1,673801	3,124659	12,400800	Max.	-1,552013	3,133171	9,265100
sd	0,967827	0,808051	2,801174	sd	0,980667	0,798156	2,762348
77				77			
Min.	-8,109538	-0,558884	-6,392300	Min.	-8,036532	-0,595129	-10,189300
1st Qu.	-6,003591	0,891270	0,037000	1st Qu.	-6,016704	0,896574	-3,143100
Median	-5,363985	1,192948	1,428300	Median	-5,413878	1,199907	-1,788000
Mean	-5,475661	1,261835	1,321632	Mean	-5,498255	1,271949	-1,855990
3rd Qu.	-4,912060	1,668270	2,728800	3rd Qu.	-4,930839	1,698927	-0,274800
Max.	-4,041990	2,754760	6,360900	Max.	-3,984541	2,731684	3,387300
sd	0,722920	0,565374	2,128070	sd	0,719226	0,559909	2,154168
78				78			
Min.	-6,918998	-1,039716	-8,925000	Min.	-7,264470	-0,970460	-10,887700
1st Qu.	-5,634256	0,401170	-0,773350	1st Qu.	-5,697956	0,405245	-4,049750

Median	-5,048070	0,900830	0,938350	Median	-5,062405	0,914955	-2,267750
Mean	-4,990678	0,946260	0,874918	Mean	-5,011516	0,950537	-2,296640
3rd Qu.	-4,413631	1,488585	2,301600	3rd Qu.	-4,421159	1,493585	-0,765325
Max.	-2,493977	3,097806	8,203400	Max.	-2,480310	3,028265	5,128100
sd	0,884895	0,736552	2,380440	sd	0,897654	0,732812	2,374936
79				79			
Min.	-7,556827	-0,422623	-8,100500	Min.	-7,527491	-0,493535	-11,135700
1st Qu.	-5,563945	0,558535	-0,498875	1st Qu.	-5,569668	0,547087	-3,639175
Median	-5,014734	1,004079	0,763800	Median	-5,013790	1,019886	-2,316900
Mean	-5,077644	1,016000	1,179034	Mean	-5,094856	1,027794	-1,986245
3rd Qu.	-4,538696	1,485410	2,732575	3rd Qu.	-4,557281	1,503972	-0,516150
Max.	-3,074468	3,167760	9,690400	Max.	-3,107582	3,153324	6,321500
sd	0,772687	0,676029	2,641911	sd	0,776411	0,684979	2,613655
80				80			
Min.	-8,210990	-0,478556	-8,527600	Min.	-8,286218	-0,360146	-11,217000
1st Qu.	-6,149159	0,726468	-0,861475	1st Qu.	-6,184800	0,722645	-4,069625
Median	-5,186582	1,157402	0,540800	Median	-5,239586	1,199351	-2,585050
Mean	-5,292337	1,173127	0,765565	Mean	-5,313882	1,184140	-2,397050
3rd Qu.	-4,441800	1,557556	2,086125	3rd Qu.	-4,462246	1,572445	-0,979550
Max.	-1,945378	3,299700	11,233400	Max.	-1,983936	3,290206	8,089600
sd	1,138755	0,607710	2,846002	sd	1,142254	0,605239	2,840408
81				81			
Min.	-8,399783	-0,632926	-6,253800	Min.	-8,418451	-0,664773	-9,579900
1st Qu.	-5,893916	0,585117	-1,376075	1st Qu.	-5,919557	0,604041	-4,606225
Median	-5,223973	0,892861	0,711000	Median	-5,249364	0,892266	-2,548050
Mean	-5,263143	0,936765	0,649888	Mean	-5,284888	0,941044	-2,535320
3rd Qu.	-4,590951	1,305453	2,648525	3rd Qu.	-4,627815	1,296088	-0,563525
Max.	-2,226400	2,595009	11,008800	Max.	-2,106724	2,584325	7,669300
sd	1,105503	0,583734	2,692977	sd	1,110207	0,573603	2,690439
82				82			
Min.	-8,022975	-2,143980	-11,752500	Min.	-8,051200	-2,099353	-15,005000
1st Qu.	-5,521803	0,366607	-1,270375	1st Qu.	-5,535026	0,398298	-4,494425
Median	-4,852999	0,777491	0,478850	Median	-4,826108	0,805936	-2,656450
Mean	-4,902347	0,757163	0,350633	Mean	-4,902333	0,789260	-2,804288
3rd Qu.	-4,368738	1,185155	2,383525	3rd Qu.	-4,332097	1,219524	-0,744200
Max.	-2,194287	3,010078	12,587500	Max.	-1,775364	3,008888	9,935000
sd	0,804445	0,755074	3,144780	sd	0,841133	0,760328	3,194956
83				83			
Min.	-7,542603	-0,536273	-11,940000	Min.	-7,808625	-0,428884	-15,057400
1st Qu.	-5,681149	0,515305	-1,522575	1st Qu.	-5,734236	0,456585	-4,719150
Median	-4,847777	1,009719	0,492150	Median	-4,830609	0,987186	-2,584650
Mean	-4,972750	1,027108	0,320903	Mean	-4,993088	1,016488	-2,816304
3rd Qu.	-4,157110	1,480992	2,666150	3rd Qu.	-4,140220	1,501915	-0,500625
Max.	-3,017797	3,106058	7,853600	Max.	-2,954459	3,061794	4,658500
sd	0,991022	0,676919	3,256953	sd	1,025525	0,688126	3,300326

Prilog 3: Statistički opisi TEC vrijednosti

Kroz cijeli period od 10. do 24. ožujka 2015. godine

THULE: DOY 069 - DOY 083					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
1,85	4,36	7,04	7,76	10,83	18,85
NYAL: DOY 069 - DOY 083					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
0,46	3,9775	7,08	7,21306	9,67	16,77
SCOR: DOY 069 - DOY 083					
Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
2,01	4,35	7,22	8,40	11,45	26,32

Statističke vrijednosti posebno za svaki dan u promatranom periodu

Total Electron Content (TEC)			
DOY	THULE	SCOR	NYAL
DOY 069 (10.3.2015)	Min. : 2,310	Min. : 2,110	Min. : 2,100
	1st Qu.: 3,870	1st Qu.: 3,660	1st Qu.: 3,635
	Median : 7,670	Median : 5,095	Median : 5,965
	Mean : 7,404	Mean : 8,331	Mean : 6,971
	3rd Qu.:10,842	3rd Qu.:14,685	3rd Qu.: 9,190
	Max. :13,060	Max. :17,320	Max. :16,430
DOY 070 (11.3.2015)	Min. : 2,160	Min. : 2,190	Min. : 2,090
	1st Qu.: 3,760	1st Qu.: 4,888	1st Qu.: 3,067
	Median : 6,560	Median : 8,660	Median : 9,295
	Mean : 7,953	Mean :10,345	Mean : 8,179
	3rd Qu.:10,890	3rd Qu.:15,363	3rd Qu.:10,883
	Max. :18,850	Max. :24,240	Max. :16,770
DOY 071 (12.3.2015)	Min. : 2,190	Min. : 2,010	Min. : 2,070
	1st Qu.: 4,747	1st Qu.: 3,910	1st Qu.: 3,567
	Median : 7,805	Median : 6,360	Median : 7,160
	Mean : 8,551	Mean : 7,745	Mean : 6,705
	3rd Qu.:13,010	3rd Qu.:11,107	3rd Qu.: 9,270
	Max. :17,140	Max. :15,120	Max. :12,030
DOY 072 (13.3.2015)	Min. : 2,160	Min. : 2,180	Min. : 2,120
	1st Qu.: 4,335	1st Qu.: 4,000	1st Qu.: 3,670
	Median : 8,215	Median : 7,715	Median : 7,320
	Mean : 9,194	Mean :10,166	Mean : 6,702
	3rd Qu.:14,932	3rd Qu.:16,240	3rd Qu.: 8,910
	Max. :17,760	Max. :25,040	Max. :13,310
DOY 073 (14.3.2015)	Min. : 1,850	Min. : 2,280	Min. : 2,000

	1st Qu.: 3,705	1st Qu.: 4,445	1st Qu.: 3,647
	Median : 6,760	Median : 6,290	Median : 6,170
	Mean : 7,881	Mean : 8,751	Mean : 6,281
	3rd Qu.:12,355	3rd Qu.:13,887	3rd Qu.: 8,607
	Max. :15,750	Max. :19,190	Max. :12,170
	Min. : 2,060	Min. : 2,200	Min. : 0,460
DOY 074 (15.3.2015)	1st Qu.: 5,947	1st Qu.: 3,688	1st Qu.: 3,585
	Median : 9,405	Median : 5,880	Median : 6,250
	Mean : 8,526	Mean : 8,062	Mean : 6,532
	3rd Qu.:10,920	3rd Qu.:12,727	3rd Qu.: 9,060
	Max. :13,730	Max. :17,940	Max. :13,810
	Min. :2,370	Min. : 2,070	Min. : 2,130
DOY 075 (16.3.2015)	1st Qu.:4,470	1st Qu.: 4,980	1st Qu.: 5,168
	Median :5,950	Median : 9,165	Median : 7,060
	Mean :5,851	Mean : 8,187	Mean : 8,058
	3rd Qu.:7,343	3rd Qu.:11,453	3rd Qu.:11,510
	Max. :8,810	Max. :13,630	Max. :14,820
	Min. : 2,250	Min. : 2,400	Min. : 3,000
DOY 076 (17.3.2015)	1st Qu.: 5,340	1st Qu.: 4,357	1st Qu.: 7,340
	Median : 7,315	Median : 6,160	Median : 9,140
	Mean : 7,131	Mean : 6,554	Mean : 8,787
	3rd Qu.: 8,762	3rd Qu.: 8,355	3rd Qu.:11,120
	Max. :11,560	Max. :13,250	Max. :12,640
	Min. : 0,000	Min. : 2,530	Min. :2,100
DOY 077 (18.3.2015)	1st Qu.: 2,730	1st Qu.: 6,930	1st Qu.:3,985
	Median : 4,725	Median : 9,040	Median :6,410
	Mean : 5,391	Mean : 8,354	Mean :5,805
	3rd Qu.: 7,353	3rd Qu.:10,050	3rd Qu.:7,230
	Max. :11,040	Max. :11,140	Max. :8,730
	Min. : 2,020	Min. : 2,180	Min. :2,090
DOY 078 (19.3.2015)	1st Qu.: 4,270	1st Qu.: 4,878	1st Qu.:3,618
	Median : 6,000	Median : 6,715	Median :6,030
	Mean : 6,113	Mean : 6,588	Mean :5,769
	3rd Qu.: 7,865	3rd Qu.: 7,750	3rd Qu.:7,730
	Max. :11,550	Max. :11,790	Max. :9,580
	Min. : 2,280	Min. : 2,110	Min. : 2,030
DOY 079 (20.3.2015)	1st Qu.: 4,230	1st Qu.: 3,240	1st Qu.: 3,250
	Median : 9,930	Median : 7,155	Median : 7,205
	Mean : 7,993	Mean : 7,071	Mean : 6,495
	3rd Qu.:11,273	3rd Qu.: 9,633	3rd Qu.: 9,213
	Max. :12,630	Max. :14,920	Max. :11,410
	Min. : 2,330	Min. : 2,050	Min. : 2,400
DOY 080 (21.3.2015)	1st Qu.: 4,800	1st Qu.: 5,907	1st Qu.: 4,405
	Median : 6,675	Median : 7,055	Median : 7,910
	Mean : 6,938	Mean : 8,612	Mean : 8,278
	3rd Qu.: 9,380	3rd Qu.:11,490	3rd Qu.:11,860
	Max. :11,570	Max. :18,170	Max. :16,520
	Min. : 2,140	Min. : 2,240	Min. : 2,310
DOY 081 (22.3.2015)	1st Qu.: 5,510	1st Qu.: 3,638	1st Qu.: 3,320
	Median : 8,835	Median : 7,755	Median : 7,240
	Mean : 7,966	Mean : 8,365	Mean : 7,409

	3rd Qu.:10,242	3rd Qu.:12,820	3rd Qu.:10,713
	Max. :13,310	Max. :19,860	Max. :16,700
DOY 082 (23.3.2015)	Min. : 2,320	Min. : 2,160	Min. : 1,910
	1st Qu.: 3,998	1st Qu.: 4,447	1st Qu.: 4,138
	Median :11,700	Median : 6,350	Median : 7,705
	Mean :10,038	Mean : 9,119	Mean : 8,062
	3rd Qu.:15,445	3rd Qu.:11,235	3rd Qu.:10,602
	Max. :18,570	Max. :26,320	Max. :16,550
DOY 083 (24.3.2015)	Min. : 2,030	Min. : 2,040	Min. : 1,850
	1st Qu.: 5,320	1st Qu.: 4,093	1st Qu.: 3,842
	Median :11,840	Median : 9,745	Median : 8,545
	Mean : 9,378	Mean : 9,780	Mean : 8,160
	3rd Qu.:13,023	3rd Qu.:13,215	3rd Qu.:12,070
	Max. :14,440	Max. :21,860	Max. :14,690